



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

TESIS DE MÁSTER

Máster

Ingeniería Estructural y de la Construcción

Título

Caracterización del HRFA de vigas prefabricadas mediante
el ensayo Barcelona

Autor

Heriberto Peña Abreu

Tutor

Pablo Pujadas Álvarez
Sergio H. Píalarissi Cavalaro

Intensificación

Ingeniería de la Construcción

Fecha

Febrero 2016

AGRADECIMIENTOS

A Dios, que esta sobre todas las cosas.

A mis tutores, Pablo Pujadas y Sergio H. Píalarissi por su gran apoyo y ayuda en la realización de esta tesis. Por sus enseñanzas y todas sus propuestas de mejora y su disposición a aclarar todas las dudas surgidas en cualquier momento.

A Davide Trentini, por permitirme entrar en el tema de la caracterización de HRF, siempre dispuesto en compartir información, y su colaboración en gran parte de los ensayos.

A los Eduardo Galeote y Rubén López, por su ayuda incondicional, compartir sus conocimientos del tema, y en manejo de herramientas.

A mi familia, en especial mis padres Heriberto y María, por el apoyo sin peros que me han brindado en todos los aspectos de mi vida.

A todos mis amigos y compañeros, en especial a: Karen, Janill, Julio, Marcos, y Oriana, por todo el tiempo que hemos pasado juntos en este largo y duro reto que supone la maestría.

A los miembros del laboratorio (Camilo Bernad, Jordi Cabrerizo, Robert Mc-Aloon y Tomás García), por toda la ayuda prestada durante la realización de los ensayos y por los momentos divertidos que amenizan el trabajo.

Al MESCyT, por proporcionarme la beca y parte de los medios para la realización de la maestría.

A todos, gracias.

RESUMEN

El empleo de hormigones reforzados con fibras de acero (HRFA) en miembros estructurales experimenta hoy en día un uso creciente. Las fibras dotan al material de una resistencia residual que aparece tras la rotura del hormigón, proporcionándole ductilidad y resistencia a tracción al material. En consecuencia, la contribución de las fibras en la resistencia del hormigón puede ser evaluada y considerada para su cálculo a efectos estructurales.

A pesar de todas las ventajas que se producen con la incorporación de fibras al hormigón, estos carecen de un ensayo único de caracterización que represente la resistencia que estas aportan. De igual forma, no existe un único modelo constitutivo para su uso en el diseño estructural. Los criterios para caracterizar los HRFA y obtener la ecuación constitutiva, varían dependiendo la norma de referencia. La identificación del modelo constitutivo a tracción único representa uno de los pasos fundamentales en el diseño de estructuras de HRFA.

Los ensayos más utilizados para el control de este tipo de hormigones son los ensayos de flexotracción. No obstante, la realización de este ensayo presenta algunos inconvenientes. Por un lado, la elevada dispersión de los resultados, estos suelen ser mayores del 20%. Por otra parte, las probetas necesarias para este ensayo son de grandes dimensiones, lo que dificulta su manipulación en el entorno de un laboratorio destinado a una realización intensiva de ensayos.

Recientemente ha sido desarrollado un método para la caracterización del HRFA, es el ensayo Barcelona. A diferencia del ensayo de flexotracción, los resultados presentan menos dispersión, mejorando la precisión en los resultados. Asimismo, las probetas para su ejecución son más manejables debido a sus menores dimensiones. Este método, empleado junto con el ensayo inductivo, permite además conocer la cantidad y orientación de las fibras en el interior del hormigón.

Por las razones expuestas, esta Tesis de Máster plantea un estudio destinado a la caracterización de HRFA en vigas a gran escala. Estas son ensayadas a flexión con el fin de obtener su respuesta estructural. Por medio del ensayo inductivo y el ensayo Barcelona, se estudia la distribución de las fibras en el elemento y la resistencia a tracción respectivamente. Luego, se comparan los resultados anteriores con un ensayo a flexotracción por medio de las ecuaciones constitutivas, con el fin de identificar cual ensayo de caracterización se asemeja más a la respuesta estructural de las vigas.

Se ha comprobado que el ensayo Barcelona en conjunto con el ensayo inductivo, caracterizan el material de manera precisa. Otro punto importante es, que la resistencia a tracción de los testigos se ha visto afectada por el eje de extracción del mismo, debido a la orientación preferente de las fibras en el elemento estructural. Al evaluar las ecuaciones constitutivas, se observa que el modelo constitutivo del ensayo Barcelona se asemeja más a la respuesta estructural de las vigas.

ABSTRACT

The use of steel fibers reinforced concrete (SFRC) in structural members nowadays is experiencing an increasing use. The fibers gives the material a residual resistance that appears after the breakage of the concrete, providing ductility and tensile strength to the material. Consequently, the contribution of the fibers in concrete strength can be evaluated and considered for calculation structural effects.

Despite all the advantages with the addition of fibers to concrete, there is not a unique characterization test representing these provided resistance. Likewise, there is not a unique constitutive model for structural design. The criteria to characterize the SFRC and get the constitutive equation, differ depending on the reference standard. Identifying of a single tensile constitutive model represents one of the key steps in the design of SFRC structures.

The most commonly test used to control this type of concrete are flexural tests. However, the performance of this test has some drawbacks. On one hand, the high dispersion of results, these are around 20%. Moreover, the specimens required for this test are big, making it difficult handling in the environment of a laboratory for intensive testing.

Recently there has been developed a method for the characterization of the SFRC, the Barcelona test. Unlike the flexural test, the results show less dispersion, thereby improving accuracy of the results. Also, the specimens are more manageable because of its smaller size. This method, used in conjunction with the inductive test also provides information on the amount and orientation of the fibers within the concrete.

For these reasons, this Master Thesis presents a study to characterization of SFRC on beams at real scale. These are tested in bending in order to obtain their structural response. By inductive test and Barcelona test, the distribution of fibers in the element and the tensile strength is studied respectively. Then, the previous results are compared with a flexural test by the constitutive equations, in order to identify characterization test which is more similar to the structural response of the beams.

It has been found that the Barcelona test with the inductive test, characterize the material accurately. Another important point is, the specimen's tensile strength was affected by the extraction axis, due to the preferred orientation of the fibers in the structural member. In assessing the constitutive equations, we see that the constitutive model of the Barcelona test is closer to the structural response of the beams.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	INTRODUCCIÓN	1
1.2	RAZÓN DE SER	2
1.3	OBJETIVOS.....	3
1.3.1	OBJETIVOS GENERALES.....	3
1.3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
1.4	METODOLOGÍA Y ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO	4
1.4.1	METODOLOGÍA.....	4
1.4.2	ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO	5
2	ESTADO DEL CONOCIMIENTO.....	7
2.1	INTRODUCCIÓN	7
2.2	HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO (HRFA).....	8
2.2.1	COMPOSICIÓN DE HRFA	8
2.2.2	FIBRAS DE ACERO	10
2.3	DETERMINACIÓN DE CANTIDAD Y ORIENTACIÓN DE FIBRAS....	11
2.3.1	ORIENTACIÓN DE LAS FIBRAS	11
2.3.2	MÉTODOS PARA DETERMINAR ORIENTACIÓN Y CANTIDAD DE FIBRAS	12
2.3.3	ENSAYO INDUCTIVO	14
2.4	ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE HRFA.....	15
2.4.1	ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN	15
2.5	ECUACIONES CONSTITUTIVAS	19
2.5.1	ECUACIONES CONSTITUTIVAS DE ENSAYOS DE FLEXOTRACCIÓN	19
2.5.2	LONGITUD CARACTERÍSTICA	21
2.5.3	ECUACIÓN CONSTITUTIVA DE ENSAYO BARCELONA	21
3	CAMPAÑA EXPERIMENTAL	25
3.1	INTRODUCCIÓN	25

3.2	PLANIFICACIÓN.....	26
3.3	MATERIALES Y DOSIFICACIÓN	27
3.3.1	HORMIGÓN	28
3.3.2	FIBRAS	29
3.4	FABRICACIÓN DE VIGAS Y PROBETAS	30
3.5	ENSAYO A COMPRESION SIMPLE.....	31
3.6	ENSAYO A FLEXOTRACCIÓN.....	32
3.7	ENSAYO A ESCALA REAL DE VIGAS.....	34
3.8	EXTRACCIÓN DE TESTIGOS.....	36
3.9	ENSAYO INDUCTIVO	40
3.10	ENSAYO BARCELONA.....	42
3.11	MAPA DE FISURAS.....	44
3.12	ABERTURA DE PROBETAS.....	45
3.13	CONTEO MANUAL DE FIBRAS.....	47
4	PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	49
4.1	INTRODUCCION	49
4.2	ENSAYO INDUCTIVO	50
4.2.1	CANTIDAD DE FIBRAS EN TESTIGOS.....	50
4.2.2	CONTRIBUCIÓN DE FIBRAS EN TESTIGOS.....	52
4.2.3	ORIENTACIÓN DE LAS FIBRAS EN TESTIGOS.....	53
4.3	ENSAYO BARCELONA	56
4.3.1	INTRODUCCIÓN.....	56
4.3.2	INFLUENCIA EN EL EJE DE EXTRACCIÓN DEL TESTIGO	58
4.3.3	INFLUENCIA EN LA ALTURA DE EXTRACCIÓN DEL TESTIGO	60
4.3.4	INFLUENCIA EN LA CANTIDAD DE FIBRAS	61
4.3.5	INFLUENCIA EN LA CANTIDAD DE FIBRAS QUE CRUZAN LA FISURA	62
4.4	ENSAYO A FLEXOTRACCIÓN.....	63
4.5	ENSAYO A FLEXIÓN A ESCALA REAL	63

4.6	ECUACIONES CONSTITUTIVAS	65
4.6.1	INTRODUCCIÓN.....	65
4.6.2	ECUACIÓN CONSTITUTIVA DE ENSAYO BARCELONA.	66
4.6.3	ECUACIÓN CONSTITUTIVA DE ENSAYO A FLEXOTRACCIÓN.	67
4.6.4	ENSAYO A ESCALA REAL	68
4.6.5	COMPARACIÓN DE ECUACIONES CONSTITUTIVAS	71
5	CONCLUSIONES.....	75
5.1	INTRODUCCIÓN	75
5.2	CONCLUSIONES GENERALES	75
5.3	CONCLUSIONES ESPECÍFICAS	76
5.4	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	77
	REFERENCIAS.....	79
	ANEJOS.....	85
	ANEJO A: FICHA TÉCNICA DE HORMIGÓN	86
	ANEJO B: FICHA TÉCNICA DE FIBRAS DE ACERO	87
	ANEJO C: MAPA DE FISURAS EN TESTIGOS	90
	ANEJO D: MAPAS RADIALES DE INDUCTANCIA POR NÚCLEO ...	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Metodología.	5
Figura 2.1. Formas (a) y secciones transversales (b) de fibras (Mármol, 2010).	11
Figura 2.2. Aspectos que influyen en la orientación de las fibras (Galeote, 2014).	11
Figura 2.3. Configuración de ensayo inductivo.	15
Figura 2.4. Configuración básica de ensayo a tracción directa.	16
Figura 2.5. Ángulo de falla (β), y ángulo de fricción interna (ϕ).	23
Figura 3.1. Planificación de campaña experimental.	26
Figura 3.2. Losa elevada de HRFA, en Erba, Italia.	28
Figura 3.3. Dimensiones de vigas.	30
Figura 3.4. Anclajes para transporte de vigas.	31
Figura 3.5. Dimensiones de probetas de ensayo a flexotracción (a) y ensayo a compresión (b).	31
Figura 3.6. Configuración del ensayo a flexotracción.	33
Figura 3.7. Esquema de ensayo a flexión a escala real (unidades en mm).	35
Figura 3.8. Ensayo a escala real 4pb de Viga A y Viga F.	36
Figura 3.9. Dimensiones de testigos.	37
Figura 3.10. Testigos de viga A.	39
Figura 3.11. Testigos de viga B.	39
Figura 3.12. Testigos de viga E.	39
Figura 3.13. Testigos de Viga F.	40
Figura 3.14. Especímenes al llegar a la UPC.	41
Figura 3.15. Equipos de medición de inductancia.	41
Figura 3.16. Configuración del ensayo a Barcelona.	43
Figura 3.17. a) Medición de ancho de fisura, b) Representación bidimensional de las probetas.	44
Figura 3.18. Segunda metodología para abrir probetas HRFA.	46
Figura 3.19. Cuñas de penetración extraídas.	46
Figura 3.20. Cuñas mal formadas por concentración de fibras y/o árido grueso.	47
Figura 3.21. Equipos utilizados para el conteo manual de fibras.	48
Figura 3.22. Fibras etiquetadas y guardadas.	48
Figura 4.1. Regresión lineal de fibras/inductancia.	50
Figura 4.2. Dosificación de fibras (en kg/m^3) por testigos y vigas.	52
Figura 4.3. Contribución de fibras en eje longitudinal de los testigos.	53
Figura 4.4. Gráficas radiales de inductancia de los núcleos a) A1, b) B7,c) E15, y d) F10; y e) ubicación de testigos mencionados.	55

Figura 4.5. Desplazamiento de la curva del ensayo Barcelona al nuevo origen.	57
Figura 4.6. Resultados de ensayo Barcelona por ejes, a) Eje X, b) Eje Z, c) Eje Y, d) Tenacidad por ejes.	59
Figura 4.7. Fibras que cruzan la fisura orientadas en los tres ejes.....	59
Figura 4.8. Resultados de ensayo Barcelona por ejes y altura de extracción, a) Eje X, b) Eje Z, c) Eje Y.....	60
Figura 4.9. a) Cantidad de fibras y energía asociada de todos los testigos, y b) con los resultados divididos por eje de extracción.....	61
Figura 4.10. Fibras que cosen la fisura vs energía.....	62
Figura 4.11. Resultados de ensayo a escala real, a) todos los resultados, b) ensayo con vigas sin girar (A, y B) y giradas 180° (E, y F).....	64
Figura 4.12. Esquema de distribución de fibras en las vigas.....	65
Figura 4.13. Ecuación constitutiva ensayo Barcelona.	67
Figura 4.14. Ecuación constitutiva ensayo a flexotracción.	68
Figura 4.15. Esquema tensión-deformación del modelo usado para la obtención de la ecuación constitutiva (Kaklauskas et al., 2001).....	69
Figura 4.16. Ecuación constitutiva por medio de iteración de ensayo a escala real con $l_{cs} = h/2$	70
Figura 4.17. Ecuación constitutiva por medio de iteración de ensayo a escala real con $l_{cs} = h$	71
Figura 4.18. Comparación de ecuaciones constitutivas.	72
Figura 4.19. Comparación de ecuaciones constitutivas, con modelo del ensayo Barcelona con factor testigo.....	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Rango de proporciones de componentes para HRFA (ACI 544.1R-96, 2009).	9
Tabla 2.2. Configuración de ensayos de caracterización de HRF (Mármol, 2010).	18
Tabla 2.3. Modelos constitutivos de diversas normativas (Blanco et al., 2013)	19
Tabla 2.4. Propuestas de longitud característica (l_{cs}) (de Montaignac et al., 2012).	21
Tabla 2.5. Ecuación constitutiva de ensayo Barcelona (Blanco et al., 2014).	22
Tabla 2.6. Coeficientes de fricción para hormigón simple según el Model Code 2010.	23
Tabla 3.1. Diseño de mezcla del hormigón.	28
Tabla 3.2. Propiedades de las fibras.	29
Tabla 3.3. Cantidad de testigos.	37
Tabla 3.4. Testigos por viga, eje, y altura de extracción.	38
Tabla 4.1. Dosificación de fibras promedio por viga.	52
Tabla 4.2. Resultados ensayo de flexotracción.	63
Tabla 4.3. Resultados de ensayo a compresión simple.	70

1 INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la industria de la construcción ha propuesto nuevas técnicas de cálculo y diseño, así como importantes avances en los materiales utilizados. El hormigón reforzado con fibras de acero (HRFA) presenta una nueva generación de hormigones especiales. La incorporación de fibras en proporciones adecuadas permite la mejora de sus características. En general, el HRFA presenta mejor comportamiento a flexotracción, mayor resistencia a tracción y un aumento de la durabilidad. La efectividad de la acción reforzante y la eficacia de la transmisión de tensiones por parte de las fibras dependen de varios factores, pero especialmente, de su cantidad y orientación en el elemento estructural.

A pesar de todas las ventajas que se producen con la incorporación de fibras al hormigón, estos carecen de un ensayo único de caracterización que represente la resistencia que estas aportan. De igual forma, no existe un único modelo constitutivo para su uso en el diseño estructural de estructuras. La identificación del modelo constitutivo a tracción representa uno de los pasos fundamentales en el diseño de estructuras de HRFA. Durante los últimos 15 años se han desarrollado numerosas recomendaciones técnicas con el fin de facilitar el diseño de este tipo de estructuras y

extender su uso. La variedad de ecuaciones constitutivas existentes hace patente la falta de un único modelo aceptado de forma general.

1.2 RAZÓN DE SER

En aras a optimizar el diseño estructural de los HRFA, resulta imprescindible disponer de modelos sólidos y racionales que reflejen de forma fidedigna el comportamiento del material. Actualmente no existe consenso en una única ecuación constitutiva, ni un único ensayo de caracterización que caracterice adecuadamente el comportamiento del HRF, sino que existen numerosas directrices y normativas que definen las bases de cálculo de este material.

Las normas y recomendaciones contemplan la utilización de ensayos para el control y la caracterización sistemática de hormigón reforzado con fibras, en especial para fibras de acero (HRFA). Entre ellas, la normativa española EHE (EHE, 2008), las recomendaciones del fib Model Code (Model Code, 2010) y la RILEM (RILEM TC162-TDF, 2003) plantean la utilización del ensayo de flexotracción con entalla. No obstante, uno de los principales inconvenientes que presenta este tipo de ensayo es la elevada dispersión en los resultados, generalmente comprendida entre valores del 20-30% (Carmona et al., 2009).

La ejecución del ensayo de flexotracción requiere la utilización de probetas de hormigón de 150x150x600 mm. Siguiendo los criterios generales para la realización de cualquier ensayo, se requiere un mínimo de tres probetas del mismo material. La cantidad y el tamaño de las probetas hace necesario manejar grandes cantidades de hormigón, para obtener resultados aceptables. En vista de las desventajas que presentan este tipo de ensayos, se ha investigado otras alternativas para la caracterización del HRFA.

El ensayo Barcelona se plantea como otra opción al ensayo de flexotracción. Este ensayo también permite la caracterización del comportamiento del HRFA. Sin embargo, a diferencia del ensayo de flexotracción, la dispersión de los resultados se reduce a valores inferiores al 10% (Molins et al., 2009). Por otro lado, las probetas empleadas en la ejecución de este ensayo tienen unas dimensiones máximas de 150x150φ mm, lo que se reproduce en un ahorro de material en comparación con otro tipo de ensayos.

Independientemente del tipo de ensayo utilizado para la caracterización de HRFA, es evidente que la cantidad, distribución, y orientación de las fibras afectan

directamente la respuesta estructural de los elementos con HRFA (ecuaciones constitutivas). Es por esto que asegurar las características resistentes planteadas en fase de proyecto exige un buen control de estos factores. Existen diferentes metodologías para el estudio de la cantidad y orientación de las fibras de elementos estructurales, entre ellas se encuentra el ensayo inductivo. Este se considera una opción sencilla y económica para comprender mejor la distribución de las fibras en elementos estructurales. Cabe destacar, que el ensayo inductivo en conjunto con el ensayo Barcelona, permite caracterizar tanto la distribución de las fibras, como su resistencia a tracción de forma acertada y sin necesidad de usar más probetas.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivos generales

En base a las razones expuestas en el apartado anterior, se define como objetivo principal de esta Tesis de Máster comparar modelos constitutivo proveniente de ensayos de caracterización de HRFA, con el modelo constitutivo proveniente de un ensayo de viga a gran escala. Con ello se busca identificar el ensayo de caracterización que se asemeja más a la respuesta estructural real. También se propone el estudio de cómo afectan parámetros tales como la cantidad, distribución, y orientación de las fibras, en la resistencia a tracción de este tipo de hormigones.

Para ello se plantea una campaña experimental que consta de probetas, y vigas a gran escala ensayadas a flexión, de estas últimas se extraen testigos con el fin de evaluar la distribución de las fibras y la resistencia a tracción del material. La combinación de los resultados obtenidos por el método Barcelona e inductivo podría proporcionar una correlación adecuada para ser aplicada favorablemente en el control de calidad del material.

1.3.2 Objetivos específicos

Con el fin de alcanzar los objetivos generales que definen el marco de estudio de esta Tesis, se plantea una serie de objetivos específicos. Estos objetivos pretenden dar cabida a un mayor estado del conocimiento del HRFA. Por esta razón, y antes de obtener los modelos constitutivos, se hace necesario entender las características que definen el HRFA.

En cuanto a la fabricación y el análisis de los resultados se plantean los siguientes objetivos específicos, con el fin de comprender el comportamiento del material:

- Realizar un estudio de la literatura existente que permita conocer los factores que influyen en las propiedades del HRF.
- Planificar una campaña experimental capaz de proporcionar los resultados necesarios para entender el comportamiento del material.
- Estudiar la distribución de las fibras en las vigas.
- Evaluar la influencia de la cantidad y orientación de las fibras en los ensayos de caracterización, y a su vez a la resistencia a tracción.
- Analizar la respuesta del material frente al ensayo Barcelona según la posición del testigo en el elemento estructural.
- Obtener las ecuaciones constitutivas de todos los ensayos, con el fin de estudiar cual se acerca más al modelo obtenido de las vigas.

1.4 METODOLOGÍA Y ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

1.4.1 Metodología

Para satisfacer los objetivos planteados en el apartado anterior la metodología que se ha seguido en este trabajo es la que se muestra a continuación. Esta se resume de igual forma en la Figura 1.1.

En un principio el autor se familiarizó con las técnicas existentes para la caracterización del HRFA, mediante la lectura de publicaciones científicas y normativas sobre la materia. De este modo se conseguía lograr una visión general del estado del conocimiento, siendo capaz de entender y reproducir los ensayos necesarios, se procedió a la planificación de la campaña experimental.

Se planteó una campaña experimental en los laboratorios de la Universidad Politécnica de Cataluña, en colaboración con la Universidad Politécnica de Milán. Esta consistió básicamente, en la fabricación de unas vigas a gran escala, las cuales se ensayaron a flexión con el objetivo de obtener la respuesta estructural, y así la ecuación constitutiva proveniente de estas. Al mismo tiempo y con el mismo material, se crearon probetas para la realización de un ensayo de caracterización a flexotracción, para obtener las ecuaciones constitutivas que se derivan del mismo.

Más adelante, se extrajeron testigos de las vigas con el fin de estudiar la distribución de las fibras en los mismos mediante el ensayo inductivo, y evaluar la

resistencia a tracción mediante el ensayo Barcelona. Se estudian algunos aspectos, como la influencia en la cantidad y orientación de las fibras en la resistencia a tracción, con la utilización en conjunto de estos ambos ensayos. Por último, se derivan las ecuaciones constitutivas de cada ensayo, con el fin de identificar cual se acerca más a la respuesta estructural de las vigas.

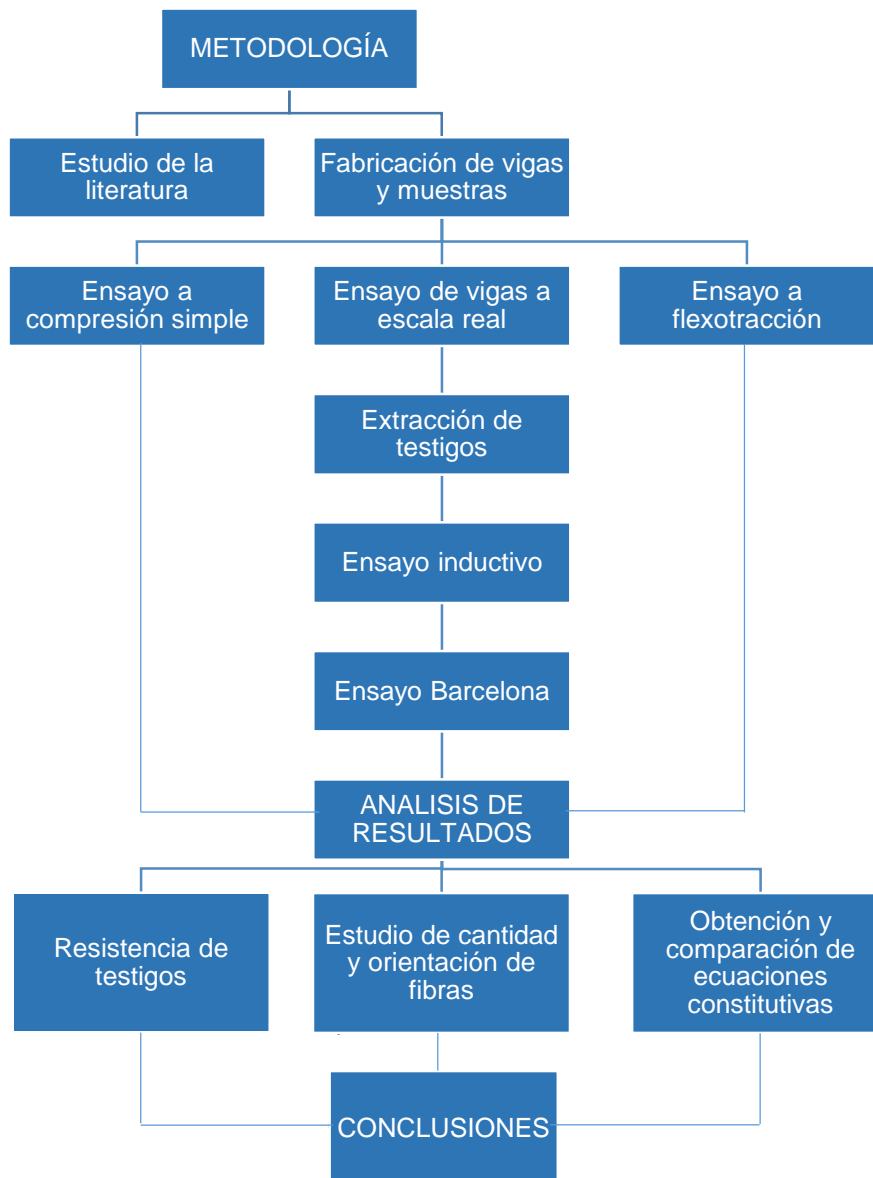


Figura 1.1. Metodología.

1.4.2 Organización del documento

En este apartado se muestra el modo en que se ha estructurado el documento, este consta de 5 capítulos, junto a las referencias bibliográficas y los anejos. A continuación se muestran los capítulos que lo conforman y una breve descripción del tema que trata cada uno.

- En el Capítulo 1 se describen las motivaciones que plantean la ejecución de este trabajo. Asimismo, se identifican los objetivos generales y específicos que pretenden alcanzarse tras la propuesta de dichas motivaciones.
- En el Capítulo 2 se realiza una breve revisión del estado del conocimiento en relación al HRF. Se presenta una breve descripción de los tipos de fibras, así como de sus principales propiedades y los factores que influyen en su orientación en el interior del hormigón, y metodologías para la evaluación de estos factores. Se definen los modelos constitutivos actuales de este material y los ensayos más empleados para su caracterización.
- El Capítulo 3 describe la planificación y la campaña experimental llevada a cabo en el laboratorio. Se muestra la dosificación y materiales empleados, además de la descripción de las probetas empleadas para la ejecución de los ensayos. La descripción de los ensayos explica el procedimiento seguido para su realización y los equipos empleados para ello.
- En el Capítulo 4 se muestran los resultados obtenidos tras la realización de la campaña experimental. Este capítulo incide en el análisis de los resultados para cada ensayo en función de las variables que cada uno conlleva. Se presentan los modelos constitutivos, así como los procesos seguidos para su obtención y diferencias entre ellos.
- Por último, el Capítulo 5 muestra las conclusiones obtenidas que se derivan de la ejecución de este trabajo. En él se da respuesta a los objetivos planteados al inicio del presente capítulo y se planteas las posibles futuras líneas de investigación que abren la propuesta de esta Tesis.

2 ESTADO DEL CONOCIMIENTO

2.1 INTRODUCCIÓN

La construcción es un campo en constante desarrollo tecnológico, en especial en las últimas décadas. Gracias a ello, se ha dado pie al desarrollo de nuevos hormigones, con nuevas e interesantes propiedades, que amplían su campo de uso. Este ha sido el caso del hormigón con fibras, independientemente del tipo, el cual incide en distintas propiedades del hormigón, tanto en fresco como endurecido.

Son bien conocidas las características que diferencian un HRF de un hormigón armado un hormigón en masa. La incorporación de fibras resulta en mejoras del comportamiento mecánico tales como la resistencia residual o la tenacidad. Además, permite el control de la fisuración por retracción y presenta una buena respuesta frente al fuego o impactos.

En el caso del hormigón reforzado con fibras de acero (HRFA), con tal de garantizar el comportamiento deseado, resulta imprescindible acompañar su aplicación con un control adecuado que permita asegurar una correcta dosificación y puesta en obra. En este tipo de hormigones, el principal control que se debe realizar es el referido a la cuantía y orientación de las fibras. La cuantía y orientación de las fibras tienen una

influencia directa en el comportamiento estructural. Por tanto, es totalmente necesario conocer ambos parámetros cuando se tenga pensado utilizar HRFA.

En el presente capítulo se presenta una revisión del estado del conocimiento en relación al HRF. En él se pretende cubrir la literatura relacionada con los objetivos planteados en esta tesis. Esto permitirá conocer algunos de los aspectos que se tratan durante el transcurso del proyecto y las motivaciones para su realización.

Con este objetivo, el capítulo se ha estructurado de modo que se introducen los temas que se tratarán en los siguientes capítulos. En primer lugar se realiza una breve introducción al HRF, dando a conocer sus principales características. Tras esta primera introducción, se describen los métodos más habituales para la caracterización mecánica de este material. Seguidamente, se muestran los factores que influyen en la orientación de las fibras y que determinan el comportamiento del HRF. Finalmente se realiza una revisión de los principales trabajos técnicos, directrices y recomendaciones normativas para la definición de las ecuaciones constitutivas que actualmente se emplean para reproducir el comportamiento a tracción del HRFA.

2.2 HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO (HRFA)

2.2.1 Composición de HRFA

A efectos de la EHE (EHE, 2008), el HRF se define como aquel hormigón que incluye en su composición fibras cortas, discretas y aleatoriamente distribuidas en su masa. Los hormigones con fibras de acero (HRFA) están formados, esencialmente, por un conglomerante hidráulico, generalmente cemento portland, áridos finos y gruesos, agua y fibras de acero discontinuas cuya misión es contribuir a la mejora de determinadas características de los hormigones.

La incorporación de fibras mejora la capacidad de transferencia de cargas y el control de la fisuración, así como el aumento de tenacidad y la durabilidad de las estructuras. Además, debido a que la introducción de fibras permite la sustitución parcial o total de armaduras, se favorece la reducción en los tiempos constructivos (Serna Ros et al., 2012). Pero debe tenerse cuidado con la trabajabilidad, estos hormigones tienen menos docilidad que los hormigones tradicionales. Debe proveerse una dispersión uniforme de las fibras y prevenirse una segregación o agrupación de las mismas (erizos).

Para evitar este tipo de problemas, en función de la cantidad de fibras que se van a adicionar al hormigón y de la geometría de éstas, el material compuesto tendrá que sufrir ciertas modificaciones respecto de un hormigón tradicional. Estas modificaciones pasan principalmente por una limitación en el tamaño máximo del árido, menores valores de relación grava-arena, mayores cantidades de aditivos reductores de agua, y mayor demanda de finos, entre otros. La Tabla 2.1 muestra el rango de proporciones para un HRFA según el ACI Committee 544 1R-96 (2009). A continuación se explica brevemente la razón de los cambios en la dosificación de un hormigón convencional al añadir fibras.

Tabla 2.1. Rango de proporciones de componentes para HRFA (ACI 544.1R-96, 2009).

Componentes de la mezcla	Tamaño máximo de árido (mm)		
	10	20	40
Cemento (kg/m³)	350 - 600	300 - 530	280 - 415
Agua/Cemento	0,35–0,45	0,35–0,50	0,35–0,55
% árido fino-grueso	45 - 60	45 - 55	40 - 55
% árido ocluido	4 - 8	4 - 6	4 - 5
Fibras conformadas (V_f%)	0,4 – 1,0	0,3 – 0,8	0,2 – 0,7
Fibras planas (V_f%)	0,8 – 2,0	0,6 – 1,6	0,4 – 1,4

- **Cemento:** este es un componente decisivo en la docilidad del material en estado fresco y, posteriormente, en las características mecánicas del hormigón endurecido. Cuanto mayor sea el contenido de fibras y menor el tamaño máximo del árido, será necesario emplear una mayor cantidad de cemento con la finalidad de proporcionar más pasta (Mármol, 2010).
- **Agua:** Se recomienda que el aumento de la consistencia debido al uso de las fibras debe ser compensado siempre con la adición de aditivos reductores de agua, sin modificar la dosificación prevista de la misma (EHE, 2008).
- **Áridos:** La movilidad potencial de las fibras depende de la proporción de árido grueso y del tamaño máximo de árido. Cuanto mayor sean estos dos parámetros menor será la movilidad potencial de las fibras (Hannant, 1978). Se recomienda también que el tamaño máximo de árido no supere: 2/3 de la longitud máxima de la fibra, 1/5 del lado menor del elemento, 3/4 de la distancia libre entre las barras de armado. Otro aspecto importante es la formación de erizos, esto se reduce con una cantidad suficiente de árido fino. Sin embargo, este riesgo aumenta cuando el contenido de fibras y su esbeltez son elevados.
- **Aditivos:** En los HRFA se emplean principalmente aditivos reductores de agua (superfluidificantes) y aireantes. El Anejo 14 de la EHE 2008 (EHE, 2008)

establece que, cuando las fibras utilizadas sean metálicas, el ión cloruro total aportado por los componentes no debe exceder del 0,4% del peso del cemento.

- Adiciones: Las adiciones usualmente empleadas en los HRF son materiales puzolánicos tales como puzolanas naturales, cenizas volantes y humo de sílice. Se hace con el fin de mejorar la cohesión del material y en consecuencia la adherencia fibra-matriz, y disminuir el riesgo de segregación.

2.2.2 Fibras de Acero

A efectos de la EHE (EHE, 2008), el HRF se define como aquel hormigón que incluye en su composición fibras cortas, discretas y aleatoriamente distribuidas en su masa. La incorporación de fibras mejora la capacidad de transferencia de cargas y el control de la fisuración, así como el aumento de tenacidad y la durabilidad de las estructuras. Además, debido a que la introducción de fibras permite la sustitución parcial o total de armaduras, se favorece la reducción en los tiempos constructivos (Serna Ros et al., 2012).

En cuanto a sus dimensiones, las fibras de acero son elementos de corta longitud, la cual suele oscilar entre 10 y 75 mm, y de pequeña sección, entre 0,1 y 1,0 mm. Respecto a los materiales, suelen ser fabricadas en acero al carbono o en acero inoxidable

El Anejo 14 de la Instrucción EHE 2008 clasifica las fibras de manera general en estructurales y no estructurales, en función de la capacidad de aumentar la resistencia del hormigón. Las fibras serán estructurales si la contribución de las mismas puede ser considerada en el cálculo de la respuesta de la sección de hormigón. Las fibras serán no estructurales en caso contrario.

Es pertinente que las fibras tengan un módulo de elasticidad y una resistencia a tracción significativamente mayor que la del hormigón, pues así se garantiza la efectividad del refuerzo con fibras. Del mismo modo, la adherencia con la matriz del hormigón debe ser del mismo orden o mayor que la resistencia a tracción de ellas (Naaman, 2000). Además, para maximizar su rendimiento, resulta conveniente que estén colocadas en la misma dirección que los esfuerzos de tracción.

Las formas geométricas de las fibras que se utilizan en la actualidad son muchas, en función de los diferentes usos a los que están destinados. Las fibras pueden ser, por ejemplo, rectas, onduladas o con extremos conformados, tal y como se muestra en la Figura 2.1.a. Asimismo, las secciones transversales de ellas adoptan también

diversas formas, pudiendo ser circulares, rectangulares o triangulares, entre otros tipos (Figura 2.1.b).

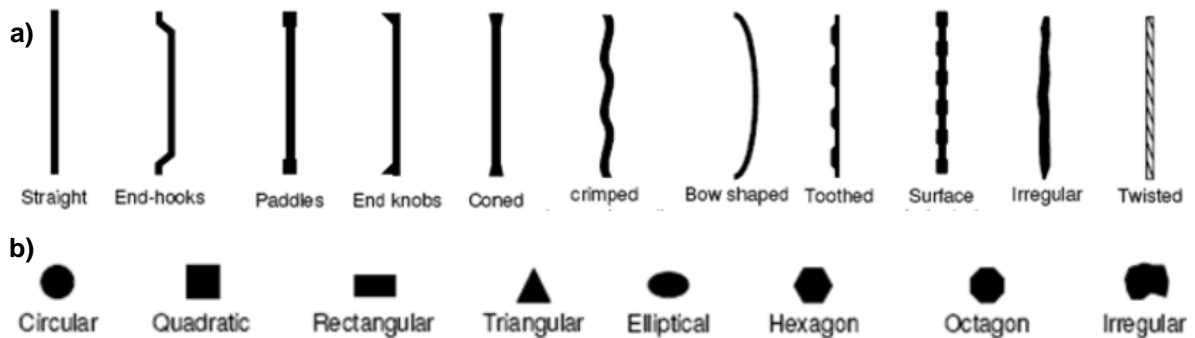


Figura 2.1. Formas (a) y secciones transversales (b) de fibras (Mármol, 2010).

2.3 DETERMINACIÓN DE CANTIDAD Y ORIENTACIÓN DE FIBRAS

2.3.1 Orientación de las fibras

La dispersión de las fibras en el interior del material se considera uno de los problemas más importantes en el diseño y para conseguir aplicaciones del HRF seguras (Ferrara et al., 2012). Esta dispersión, entendida como orientación y posición en el interior de la matriz del hormigón, es uno de los factores que influyen en la resistencia postfisuración. Por ello, el número de fibras efectivas en la superficie de fractura tiene una gran influencia en la resistencia residual en la fase postfisuración (Abrishambaf et al., 2012).

La influencia del proceso de fabricación del HRF es de gran importancia. Generalmente, la orientación y dispersión de las fibras es consecuencia de diversos factores que se producen en el estado fresco del hormigón, pudiendo considerarse independientes entre ellos (Blanco Álvarez, 2013). Entre estos factores, los más importantes se resumen en la Figura 2.2.



Figura 2.2. Aspectos que influyen en la orientación de las fibras (Galeote, 2014).

La forma de hormigonado de un elemento es un factor importante a tener en cuenta en la orientación de las fibras. Los estudios realizados por algunos autores confirman que las fibras se orientan según el flujo del hormigón durante su vertido (Abrishambaf et al., 2012) (Pujadas, 2013). Otros también muestran en los resultados de sus campañas experimentales cómo afectan los moldes de las probetas en la orientación de las fibras (Martinie et al., 2011).

En este último, el flujo del hormigón se divide en dos categorías: un flujo libre y un flujo confinado. Este efecto se produce por el conocido efecto pared, por lo que la velocidad del flujo del hormigón en contacto con la pared del molde es menor. En un flujo libre, por no haber contacto con paredes, se asume una velocidad constante de todo el flujo. Esta diferencia en las velocidades genera diferencias de tensiones, lo que influye en la orientación de las fibras en función del flujo al que se encuentren sometidas (Galeote, 2014).

La vibración produce que las fibras se orienten preferentemente en un plano horizontal, aunque un exceso de vibración puede producir la segregación del hormigón. No obstante, la orientación provocada por la vibración depende en gran medida del tiempo de vibrado y la trabajabilidad del hormigón. A pesar de ello, en hormigones con una trabajabilidad baja, una vibración con una duración entre 1 y 2 minutos no supone un efecto significativo en la orientación de las fibras (Dupont et al., 2005).

2.3.2 Métodos para determinar orientación y cantidad de fibras

Para determinar la cantidad o distribución de fibras de acero en un volumen de HRFA, se han desarrollado diferentes métodos más o menos complejos. Algunos de estos métodos determinan o bien la cuantía, o bien la orientación de fibras, mientras que otros permiten determinar ambos valores. De este modo, a igualdad de otros valores (costes, facilidad de uso, precisión, etc.), resulta más ventajoso la obtención de los dos valores con un único ensayo (López, 2013).

Los métodos existentes se pueden clasificar de diversas formas, teniendo en cuenta una u otras características de estos. En este trabajo se opta por clasificarlos en 3 tipos: métodos manuales, métodos directos y métodos indirectos. Otra forma común de clasificarlos es en destructivos (si requieren la rotura parcial o total del hormigón) y no destructivos (cuando el volumen de hormigón tras el ensayo queda intacto).

Los métodos manuales son aquellos que determinan cuantía y/u orientación de las fibras sin mediante el recuento manual de fibras. Los métodos directos son aquellos que se miden el número y/u orientación de fibras y se basan en el tratamiento de

imágenes Por último, los métodos indirectos son aquellos que miden algún parámetro físico que se correlacione con la cuantía o dirección de las fibras. A continuación se presentan algunos de los métodos actuales de cada una de estas clasificaciones.

Recuento manual de fibras

En términos tecnológicos, la manera más simple de determinar la cuantía de fibras en una muestra de hormigón es contar el número de fibras de forma manual. De esta forma, basta con romper el hormigón (si está endurecido) o lavarlo (si está fresco) para separar las fibras de acero para determinar el número de fibras existentes. Este método es el que se recoge en la normativa UNE-EN 14721:2006+A1.

Tiene un coste de ejecución barato, pues apenas se necesitan aparatos y herramientas que no estén disponibles en todos los laboratorios de estructuras. De este modo, basta con una prensa de ensayo a compresión y un martillo o machacadora para romper el hormigón, así como una báscula para pesar las fibras. La principal desventaja de este método es que su aplicación exige la rotura de la muestra, con lo que se pierde la repetitividad del ensayo. Este hecho exige la ausencia total de errores al realizar la medida, resultando necesario cierto cuidado por la persona que lo realiza.

Métodos directos de medida con imágenes

El principio de funcionamiento de los métodos directos es bien sencillo: se obtiene una imagen del hormigón y ésta se analiza para diferenciar las fibras de acero del resto de material. La principal diferencia entre estos métodos es la forma en la que se obtiene la imagen, aplicando técnicas más o menos complejas, en función de los recursos disponibles. A la imagen adquirida se le realiza un análisis que permita determinar la dirección de las fibras.

Aunque la mayoría de los métodos de análisis de imagen que se han desarrollado son métodos manuales o semi-automáticos, a partir del desarrollo de los ordenadores se vienen empleando métodos automáticos. En este sentido, cabe destacar que la obtención de información estadística sobre la distribución de los componentes del hormigón, sólo es posible mediante el empleo de técnicas automáticas (Chermant, 2001). Algunas metodologías de este tipo son: fotografía, radiografía, tomografía computarizada (TAC).

Métodos indirectos de medida

Estos métodos están basados en la medida de alguna propiedad física, como por ejemplo la resistencia eléctrica. Correlacionando el valor medido, se puede determinar cuál es la cuantía y/u orientación de las fibras en el hormigón.

A diferencia de los métodos comentados en apartados anteriores, los métodos indirectos requieren de una calibración. A priori, esto supone una desventaja respecto a los otros métodos, pero esta desventaja se compensa con que no son destructivos. Además, a esto hay que sumar que su aplicación es más rápida que en los métodos anteriores. Algunas metodologías de este tipo son: electroscopia de la impedancia, microondas, resistencia eléctrica, inductancia magnética

Este último ha sido seleccionado para esta campaña experimental por su simplicidad, y disponibilidad de los equipos necesarios en el laboratorio. Además este ensayo presenta una alta precisión, robustez y permite la evaluación de un gran volumen de material en un corto período de tiempo (Cavalero et al., 2015).

2.3.3 Ensayo Inductivo

Los métodos magnético-inductivos aprovechan las propiedades del electromagnetismo para detectar la distribución y cuantía de las fibras de acero en el HRFA. De este modo, si el campo magnético es creado por una bobina por la que circula una corriente, se puede determinar las propiedades de las fibras de forma rápida.

La inductancia se conoce como la oposición a la variación de la corriente eléctrica que circula por una bobina situada bajo un campo magnético. Si en el campo magnético provocado por la bobina se coloca un elemento metálico, la inductancia propia de la bobina varía, lo cual se puede medir con un aparato apropiado. En la Figura 2.3 se presentan los dos equipos principales para el ensayo, un medidor de inductancia (a) y la bobina (b).

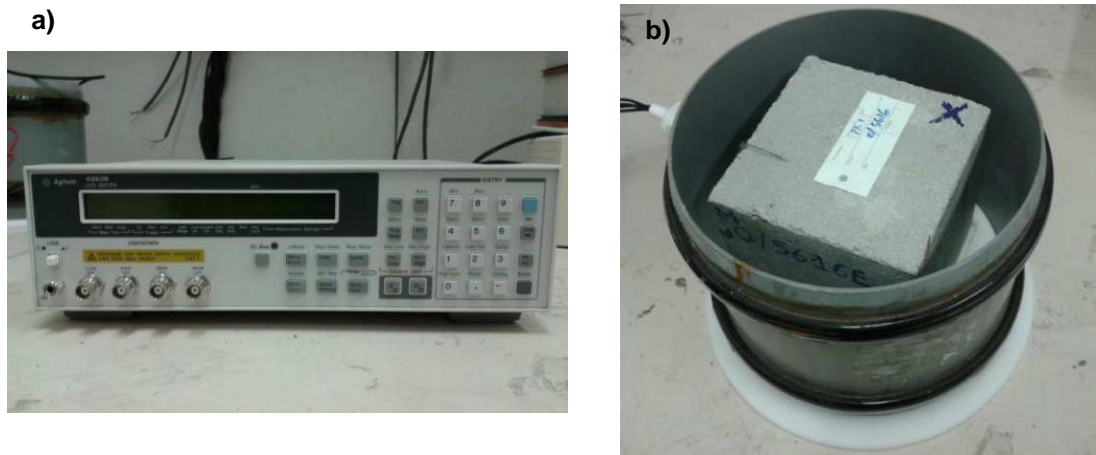


Figura 2.3. Configuración de ensayo inductivo.

Suponiendo que el elemento metálico son las fibras de acero del HRFA y que la afección a la autoinductancia por parte del hormigón es nula, se puede relacionar la cuantía de fibras con la autoinductancia de la bobina. En otras palabras, midiendo la inductancia propia de la bobina, al acercar una muestra de HRFA al campo magnético, su valor varía.

Cuanto mayor es la cuantía de fibras, mayor es la variación y, por tanto, se puede relacionar la variación de autoinductancia con la cantidad de fibras metálicas. La orientación de las fibras se determina realizando mediciones con diferentes orientaciones de la muestra de HRFA. Las fibras de acero estarán orientadas principalmente en la dirección donde las lecturas de inductancia sean mayores (López, 2013). Tienen la ventaja de no ser destructivos ni requieren un equipo complejo. Además, la determinación de la cuantía y orientación de fibras se hace de forma rápida, sin tener que realizar una preparación especial de las muestras a analizar.

Como principal problema, requieren una calibración del equipo de medida, aunque su solución es fácil. En el método que aquí en este trabajo se plantea, basta con machacar una probeta y pesar las fibras para calibrar. Más detalles sobre los equipos y procedimientos utilizados se muestran en el Capítulo 3, Campaña Experimental.

2.4 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE HRFA

2.4.1 Ensayos de caracterización

Una de las principales razones por las que elegir un método de ensayo u otro consiste en la intención de determinar uno o diversos parámetros. A pesar de ello, a la hora establecer los métodos de ensayo más adecuados para un material se identifican

varios criterios para su idoneidad. Estos criterios pueden resumirse en los siguientes puntos (Kooiman, 2000):

- Complejidad asociada al ensayo (preparación de las probetas, configuración y ejecución del ensayo).
- Capacidad de ser adecuadamente reproducible en diferentes laboratorios.
- La fiabilidad y la dispersión asociada a los resultados.
- Costes de realización.
- Aceptación del método de ensayo por la comunidad científica.

Los ensayos de tracción uniaxial son los que de manera más fidedigna recogen el comportamiento uniaxial en régimen postfisuración del HRF. De sus resultados, además, puede derivarse directamente la relación $\sigma - w$ para caracterizar el material (Pujadas, 2013). Sin embargo, dicho ensayo presenta claras dificultades técnicas que inevitablemente influyen en los resultados finales obtenidos. Entre ellas cabe destacar la heterogeneidad del material, las imperfecciones de la probeta, las eventuales excentricidades durante el proceso de carga (difícilmente evitables) o la rotura de la probeta por sus extremos (Van Mier et al., 2002). En la Figura 2.4 se muestra la configuración básica del ensayo a tracción directa.

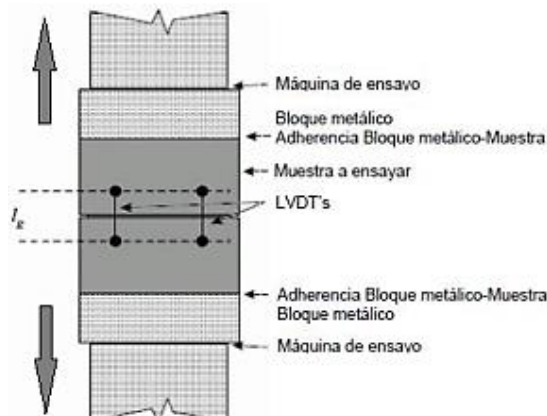


Figura 2.4. Configuración básica de ensayo a tracción directa.

Cabe destacar que existen otros inconvenientes tales como la sujeción de la probeta y la dificultad de asegurar la estabilidad del ensayo. Consecuentemente, las tensiones postfisuración y los parámetros de tenacidad obtenidos presentan unos coeficientes de variación de aproximadamente un 30%. Esta elevada dispersión hace que el ensayo sea de difícil aplicación para el control sistemático del HRF (Stroband, 1998). Estas son solo algunas de las razones por la que, el ensayo de tracción directa

no cumple satisfactoriamente con gran parte de los criterios mencionados por Kooiman (2000).

Diversas normativas y recomendaciones plantean el uso de diferentes ensayos para la caracterización del HRF. El más extendido para el control de este material es el ensayo de flexotracción (Galeote, 2014), que presenta dos variaciones en cuanto a su configuración y ejecución. Estas dos variaciones se basan en el número de puntos de aplicación de carga para llevar a rotura el material. Mientras en uno se aplica una carga puntual en el centro de la probeta, *three-point bending test* (EN 14651, 2005), en otro se aplican dos cargas puntuales a tercios de la luz (*four-point bending test*) (NBN B 15-238, 1992) o (ASTM C1609, 2007). En inglés se le llama a estos tipos de ensayo *three-point bending test* (3pb) y *four-point bending test* (4pb), respectivamente. A pesar de requerir el uso de probetas relativamente pesadas, la ventaja de este método es su simplicidad. Sin embargo, estos ensayos presentan una alta dispersión de los resultados, a menudo por encima del 20% (Parmentier et al., 2008), que compromete su uso como herramienta de control.

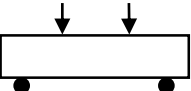
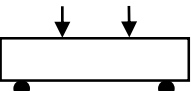
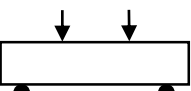
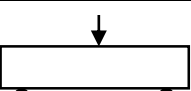
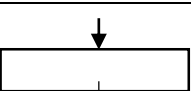
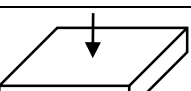
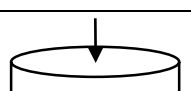

Alternativamente, existen en normativas y recomendaciones otras propuestas de ensayo como el *round determinate panel test* (ASTM C-1550, 2012) y el *Wedge Splitting Test* (Tscheegg et al., 1986). Éste ha sido modificado por di Prisco et al. (2010) y Ferrara et al. (2011) incorporando un corte en forma de cuña con entalla (*Double Edge Wedge Splitting* o *DEWS*). Con ellas, se logra reducir sensiblemente la dispersión de los resultados (Molins et al., 2009), pero sus costes asociados y complejidad, dificultan su uso para el control sistemático y para la estimación de parámetros de diseño (Pujadas, 2013).

Como alternativa a los mencionados ensayos de flexotracción, el Departamento de Ingeniería de la Construcción de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) desarrolló el ensayo Barcelona (Molins et al., 2009). Este ensayo permite la determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción del HRF y se encuentra recogido en la norma UNE 83515 (2010). Éste se trata de una extensión del ensayo de doble punzonamiento (Double Punch Test, DPT) inicialmente ideado por (Chen, 1970). Dicho ensayo conduce a valores representativos de la resistencia y de la tenacidad del material, con un coeficiente de variación medio inferior al 13% (Molins et al., 2009), lo que lo convierten en un ensayo adecuado para el control sistemático de HRF en obra.

En la Tabla 2.2 se presenta un resumen de los ensayos de caracterización anteriormente mencionados, en esta se presenta el valor de superficie específica de rotura

de cada ensayo. Mediante este parámetro se puede observar la “eficacia” de cada ensayo, ya que superficies de rotura específicas pequeñas indicarán que el ensayo involucra grandes cantidades de hormigón obteniendo una superficie de rotura pequeña en la probeta.

Tabla 2.2. Configuración de ensayos de caracterización de HRF (Mármol, 2010).

Configuración	Ensayo	Esquema	Dimensiones (cm)	Superficie Específica de Rotura	C.V. (%)
Ensayo de viga con carga a tercios	ASTM C-1018		35x10x10	0,0286	15
	NBN B 15-238		(60-75)x15x15	0,0133	12 -20
	EFNARC		55x7,5x12,5	0,0182	20
Ensayo de viga con carga centrada	Típico		55x7,5x12,5	0,0182	17
	RILEM		(55-60)x15x15	0,0152	10 - 25
Ensayo de Panel	EFNARC		60x60x10	0,0722	9
	Round determinate panel test		7,5xφ80	0,0238	6 - 13
Ensayo doble punzonamiento	Ensayo Barcelona		15xφ15	0,1274	13

Mientras mayor superficie de rotura se obtiene en una muestra, menor es su dispersión al poder establecer una resistencia promedio a la tracción (Mármol, 2010). Se comprueba que el ensayo más eficiente es el ensayo Barcelona con una superficie de rotura específica de 0,1274 seguido del ensayo de Panel EFNARC con 0,0722. Por el contrario, los ensayos menos eficientes son los ensayos de viga con carga a tercios NBN B 15-238 con un valor de 0,0133, seguido del ensayo de viga con carga centrada y el ensayo de viga con carga a tercios EFNARC con un valor de la superficie específica de rotura de 0,0182 en ambos ensayos.

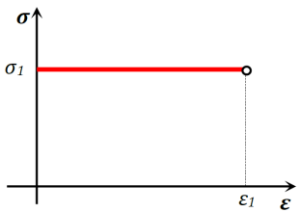
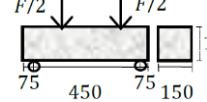
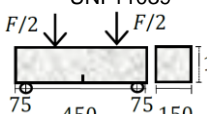
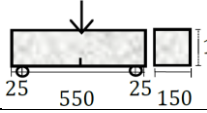
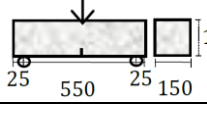
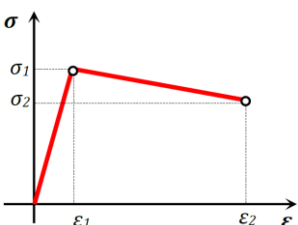
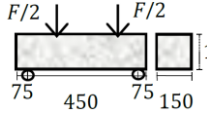
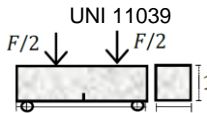
2.5 ECUACIONES CONSTITUTIVAS

2.5.1 Ecuaciones constitutivas de ensayos de flexotracción

A pesar del potencial que presenta el HRFA, la falta de códigos y normativas para su diseño ha limitado la expansión en su utilización (di Prisco et al., 2009). De hecho, los criterios existentes para el diseño con hormigón convencional pueden ser difícilmente adaptables al HRFA, puesto que éste presenta un comportamiento no lineal debido a que las fibras comienzan a trabajar tras la aparición de la primera fisura. No obstante, las nuevas investigaciones acerca de este material arrojan nuevas técnicas y métodos para su diseño.

La fuerza residual en la etapa postfisuración es suficientemente importante como para no poder ser ignorada. Por ello, y durante los últimos años, distintos comités de regulación europeos han planteado modelos constitutivos para el HRF. Estos se muestran en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Modelos constitutivos de diversas normativas (Blanco et al., 2013)

Diagrama	Parámetros	Caracterización	
	$\sigma_1 = f_{eq,ctd,II} = f_{eq,ctk,II} \cdot \alpha_c^f \cdot \alpha_{sys} / \gamma_{ct}^f \leq f_{eq,ctd,I}$ $(\alpha_{sys}: \text{coeficiente por efecto tamaño}; \alpha_c^f: \text{coeficiente de comportamiento diferido})$ $\epsilon_1 = \epsilon_u = 10\text{‰}$	NBN B 15-238 	DBV
	$\sigma_1 = f_{Flu} = f_{eq2}/3$ $\epsilon_1 = \epsilon_u = [20\text{‰ softening}; 10\text{‰ hardening}]$	UNI 11039 	CNR-DT 204
	$\sigma_1 = f_{ctRd} = 0,33 f_{R,3,d}$ $\epsilon_1 = \epsilon_u = [20\text{‰ flexión}; 10\text{‰ tracción}]$	EN 14651 	EHE
	$\sigma_1 = f_{Flu} = f_{R3}/3$ $\epsilon_1 = \epsilon_u = [20\text{‰ softening}; 10\text{‰ hardening}]$	EN 14651 	MC
	$\sigma_1 = f_{eq,ctd,I} = f_{eq,ctk,I} \cdot \alpha_c^f \cdot \alpha_{sys} / \gamma_{ct}^f$ $\sigma_2 = f_{eq,ctd,II} = f_{eq,ctk,II} \cdot \alpha_c^f \cdot \alpha_{sys} / \gamma_{ct}^f \leq f_{eq,ctd,I}$ $\epsilon_2 = \epsilon_u = 10\text{‰}$	NBN B 15-238 	DBV
	$\sigma_1 = f_{Fls} = 0,45 f_{eq1}$ $\sigma_2 = f_{Flu} = k[f_{Fls} - (w_u/w_2)(f_{Fls} - 0,5 f_{eq2} + 0,2 f_{eq1})]$ $k = [0,7 \text{ tracción}, 1 \text{ otros casos}]$ $\epsilon_2 = \epsilon_u = [20\text{‰ softening}; 10\text{‰ hardening}]$	UNI 11039 	CNR-DT 204

2.5.2 Longitud característica

La descripción del comportamiento a tracción del hormigón reforzado con fibras puede realizarse, entre otras, mediante la relación $\sigma - w$ (Löfgren et al., 2005) relacionado con el concepto del modelo de la fisura ficticia (*fictitious crack model*), o la relación $\sigma - \varepsilon$ (Laranjeira, 2010). Para la obtención del ancho de fisura existe un factor importante a considerar, este es la longitud característica (l_{cs}). Es el parámetro que relaciona deformación (ε) con ancho de fisura (w), su relación se explica con la Ecuación 2.1 (Bischoff, 2003) (Fernandes, 2004).

$$w = f(\varepsilon, l_{cs}) = (l_{cs})\varepsilon \quad 2.1$$

Cuanto mayor sea l_{cs} menor será la resistencia a flexión estimada del elemento y consecuentemente, mayor el ancho de fisura para un momento dado. Por tanto, escoger valores altos de l_{cs} inevitablemente conduce a predicciones de ancho de fisura y resistencia última conservadoras (Pujadas, 2013).

Tal y como puede observarse en la Tabla 2.4, existen numerosas propuestas para tratar de evaluar dicha longitud, sin embargo no se ha alcanzado hasta el momento un consenso para la definición de un único valor. La clara dependencia del tipo y cuantía de fibra, resistencia de la matriz, geometría del elemento ensayado, así como de las condiciones de ensayo y niveles de carga, dificultan enormemente su determinación (Barros et al., 1999).

Tabla 2.4. Propuestas de longitud característica (l_{cs}) (de Montaignac et al., 2012).

Refuerzo	l_{cs}	Referencias
HRF(A)	$h/2$	Ultkjaer et al., 1995; Pedersen, 1996; Iyengar et al., 1998; RILEM TC 162, 2002; Massicotte, 2004
	$2h/3$	AFGC, 2002
	$h/2$	CNR, 2006; FIB, 2010
	$2h$	Stack, 2008
HRF(A)+RC	Mín [s_m ; $h/2$]	Massicotte, 2004
	Mín [s_m ; y]	CNR, 2006; FIB, 2010

2.5.3 Ecuación constitutiva de ensayo Barcelona

Como se ha visto en gran parte de la literatura, el ensayo Barcelona produce valores de tensión residual y resistencia con un coeficiente medio de variación normalmente por debajo que los ensayos de viga. Tales evidencias sugieren que este ensayo podría ser una opción adecuada para el control sistemático de la calidad del

HRF. Sin embargo, la aceptación en la práctica todavía se ve obstaculizada por la falta de formulación simplificada a los modelos de tracción constitutivos derivados de los resultados de las pruebas.

Para la representación de la ecuación constitutiva Blanco et al. (2014), proponen una formulación analítica para la estimación de la curva de tracción constitutiva de los HRF directamente de los resultados de la prueba de Barcelona. Esta fue obtenida a partir de una extensa campaña experimental, y validada a través de un análisis de elementos finitos utilizando resultados de pruebas de laboratorio, realizadas con hormigón reforzado con fibras de acero y plástico. Los resultados de esta formulación fueron comparados con otros resultados de ensayos de viga del mismo hormigón, dando resultados similares a las demás propuestas de ecuaciones constitutivas. La Tabla 2.5 muestra la formulación de la ecuación constitutiva del HRF a partir del ensayo Barcelona.

Tabla 2.5. Ecuación constitutiva de ensayo Barcelona (Blanco et al., 2014).

Deformación (‰)	Esfuerzo (MPa)
$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_{cm}}$	$\sigma_1 = \frac{F_{pmax}}{2 \cdot \pi \cdot A} \cdot \frac{\cos\beta - \mu_k \cdot \operatorname{sen}\beta}{\operatorname{sen}\beta + \mu_k \cdot \cos\beta} = \omega F_{pmax}$
$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 + 0,1$	$\sigma_2 = \frac{F_{0,02mm}}{2 \cdot \pi \cdot A} \cdot \frac{\cos\beta - \mu_k \cdot \operatorname{sen}\beta}{\operatorname{sen}\beta + \mu_k \cdot \cos\beta} = \omega F_{0,02mm}$
$\varepsilon_3 = 4,0$	$\sigma_3 = \frac{F_{0,75mm}}{2 \cdot \pi \cdot A} \cdot \frac{\cos\beta - \mu_k \cdot \operatorname{sen}\beta}{\operatorname{sen}\beta + \mu_k \cdot \cos\beta} = \omega F_{0,75mm}$
$\varepsilon_4 = 20,0$	$\sigma_4 = \frac{F_{4,0mm}}{2 \cdot \pi \cdot A} \cdot \frac{\cos\beta - \mu_k \cdot \operatorname{sen}\beta}{\operatorname{sen}\beta + \mu_k \cdot \cos\beta} = \omega F_{4,0mm}$

Siendo:

- $A = \frac{d \cdot h}{4} - \frac{d^2}{4 \cdot \tan\beta}$, d y h son el diámetro y la altura de la probeta respectivamente.
- E_{cm} , módulo de elasticidad promedio a los 28 días de edad del hormigón.
- β , ángulo de falla.
- μ_k , coeficiente de fricción cinemática.

En la formulación vista en la tabla anterior, se requieren los valores del ángulo de falla (β), el coeficiente de fricción cinética (μ_k) del material. El valor de β se define generalmente en la literatura por medio del ángulo de fricción interna del material (φ) ya que este determina el agrietamiento de la superficie de la cuña cónica (ver Tabla 2.4). La literatura muestra valores de β iguales a 25° como buena aproximación (Blanco et al., 2014; Pujadas, 2013), de todas formas éste puede medirse manualmente al abrir las probetas luego del ensayo sin mucha dificultad.

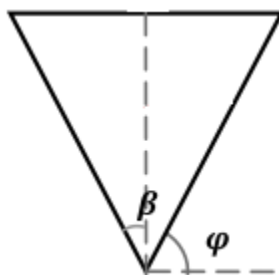


Figura 2.5. Ángulo de falla (β), y ángulo de fricción interna (ϕ).

En cuanto al coeficiente de fricción, los valores presentados en la literatura suelen cubrir el coeficiente de fricción estática de hormigón (μ_s). Sin embargo, poca información está disponible para el coeficiente de fricción cinética (μ_k).

De todas formas, es sabido que el valor de μ_k para la misma superficie tiende a ser ligeramente menor que μ_s . Sabiendo esto y en ausencia de valores confiables de μ_k , el Model Code (Model Code, 2010) propone valores de μ_s y se resumen en la Tabla 2.6. Teniendo en cuenta el aspecto de la cuña cónica después de la prueba (ver Figura 3.19, en el Capítulo 3), se supone que los μ_s deben estar en la gama de superficies rugosas. Sin embargo, el valor debe ser reducido para tener en cuenta las diferencias entre μ_k y μ_s . Entonces, un μ_s igual a 0,7 se considera una primera aproximación razonable (Blanco et al., 2014). Es importante señalar que se requieren más estudios para caracterizar μ_k y las variables que afectan a este parámetro.

Tabla 2.6. Coeficientes de fricción para hormigón simple según el Model Code 2010.

Rugosidad de interface	Coeficiente de fricción (-)
Interfaz suave	0,5 – 0,7
Interfaz rugosa	0,7 – 1,0
Interfaz con rugosidad alta	1,0 – 1,4

3 CAMPAÑA EXPERIMENTAL

3.1 INTRODUCCIÓN

En la literatura existen numerosas referencias a campañas experimentales de elementos de HRFA a nivel probeta o espécimen. Sin embargo, los resultados sobre la respuesta de elementos de HRFA a escala real son menos habituales. Con el fin de caracterizar el material por medio de diferentes ensayos, y comparar los resultados con los obtenidos a escala real por medio de las ecuaciones constitutivas, se ha propuesto la siguiente campaña experimental detallada en este capítulo.

La normativa española sugiere varios ensayos para la caracterización del HRF. Entre los posibles ensayos, el más conocido y utilizado para el HRF son los ensayos de flexotracción. Sin embargo, se ha estudiado que otras metodologías pueden ser igual o más eficaces para caracterizar el material, una de esta es el ensayo Barcelona. Con el objetivo de caracterizar el material y comparar metodologías se han elegido el ensayo Barcelona, y un ensayo a flexotracción (3pb).

Otro aspecto importante en elementos de HRF es que la posición y orientación de las fibras en el interior del hormigón no es homogénea. Por lo que este puede ser un factor importante, que puede alterar tanto los resultados de los elementos a escala real

como a los ensayos de caracterización. Para estudiar este fenómeno, se ha sugerido agregar a la campaña experimental el ensayo inductivo. Este permite conocer la orientación y cantidad de fibras en el material de manera precisa y no destructiva.

El objetivo de este capítulo es explicar las características de los materiales empleados, así como el procedimiento seguido en los ensayos para lograr los objetivos antes mencionados. En primer lugar, se describe la planificación propuesta para la realización de esta campaña experimental. Luego, se presentan los materiales y geometrías de las muestras ensayadas. Asimismo, se explica detalladamente cada fase de la planificación de los ensayos, en estas se muestran el número de muestras, y el procedimiento de los ensayos realizados.

3.2 PLANIFICACIÓN

La campaña experimental se ha planteado en dos fases, esta puede apreciarse en el siguiente mapa conceptual de la Figura 3.1.

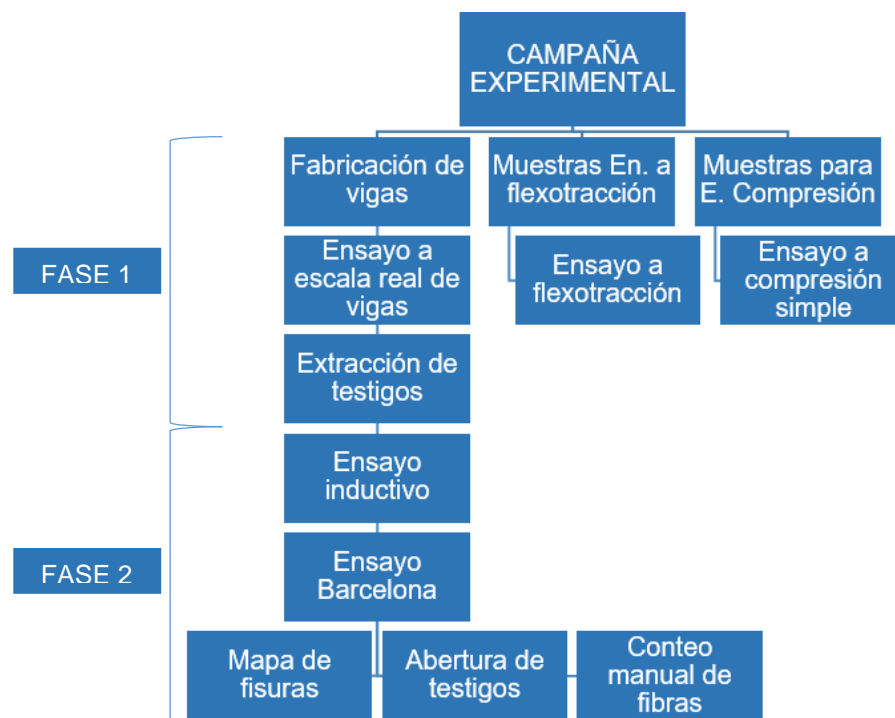


Figura 3.1. Planificación de campaña experimental

Como puede verse en el esquema anterior, el primer paso fue la fabricación de las vigas a escala real y las muestras del ensayo a flexotracción. Al finalizar ambos ensayos, se procedió a extraer los testigos de las vigas a escala real. Luego se realizó el ensayo inductivo, seguido del ensayo Barcelona a los testigos extraídos. Más adelante, se elaboró el mapa de fisuras de todos los especímenes. Por último, se

eligieron algunas de las probetas para abrirlas por medio de las fisuras producidas por el ensayo Barcelona, contar las fibras que cruzaban la grieta y extraer las cuñas cónicas. Al mismo tiempo, se eligió otro grupo de testigos para machacarlos y sacar las fibras de su interior. Se entra más en detalle sobre el objetivo y procedimiento de cada fase de la campaña experimental, en los apartados siguientes.

Importante destacar la colaboración de la Universidad Politécnica de Milán (UPM), Italia, la cual utilizó sus laboratorios y técnicos para hacer posible gran parte de esta campaña experimental. La fabricación de las vigas a escala real, las muestras para el ensayo a flexotracción, así como la realización de ambos ensayos y la extracción de testigos, fue realizada por dicha institución (Fase 1, Figura 3.1). La cual, procedió a enviar los resultados obtenidos, así como los especímenes extraídos a las facilidades de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), Barcelona, para la continuación de los demás ensayos (Fase 2, Figura 3.1).

La campaña experimental tuvo una duración aproximada de 8 meses. La primera fase inicio en los días del mes de marzo de 2015, con la fabricación de las vigas en Italia. Los resultados de los ensayos de flexotracción, así como los testigos, llegan a Barcelona en los primeros días de junio del mismo año, para el inicio de la segunda fase. El último ensayo culmina en los inicios del mes de octubre de 2015, con este acaba la segunda fase y toda la campaña experimental.

3.3 MATERIALES Y DOSIFICACIÓN

Para el desarrollo de este estudio se ha utilizado una única dosificación, para no añadir variables al estudio, se ha considerado también un único contenido de fibras de acero. Tanto el hormigón como las fibras, provienen de la construcción de una losa elevada en una obra privada, en marzo de 2015, en la localidad de Erba, de la provincia de Como, Italia. También se utilizó un pequeño refuerzo longitudinal positivo en la losa elevada, como puede verse en la Figura 3.2. En las imágenes siguientes se presenta la losa al momento de su hormigonado.

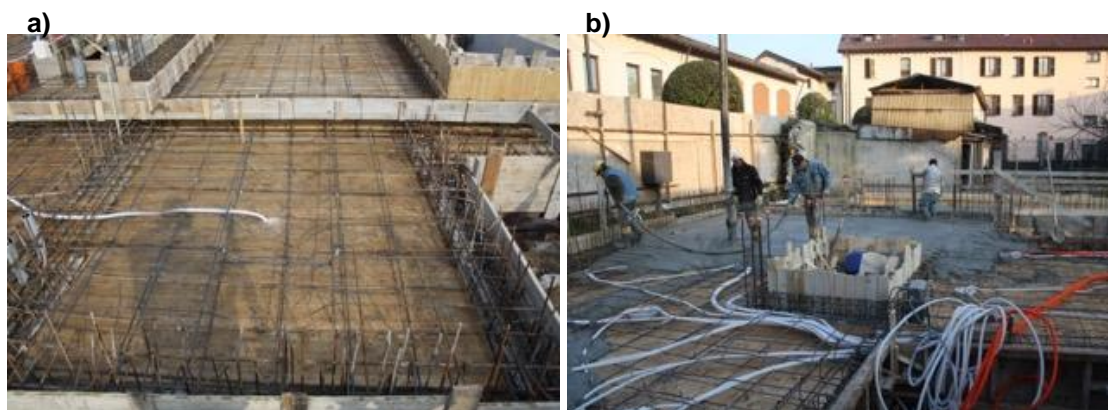


Figura 3.2. Losa elevada de HRFA, en Erba, Italia.

En el mismo lugar de la obra, se construyeron las seis vigas a escala real con dimensiones 250x500x1500 mm, dos de forma preliminar de las cuales no se consideraran en los análisis, y las cuatro restantes serán las finales que si caracterizaran el material. De estas últimas cuatro mencionadas es de donde se extraen más adelante los 56 testigos a ensayar, estos son de forma cilíndrica con diámetro y altura iguales de 100 mm. Al mismo tiempo, se prepararon las muestras para el ensayo a flexotracción y ensayo a compresión. Todas las vigas y las muestras fueron luego trasladadas a los laboratorios de la UPM, para empezar con los ensayos de flexotracción. A continuación se presentan más detalles sobre las propiedades de los materiales utilizados.

3.3.1 Hormigón

El hormigón utilizado tiene la dosificación mostrada en la Tabla 3.1. Este contiene: un tipo de cemento CEM II/ A-LL 42.5 R de la fábrica Holcim, aditivo plastificante Dracril 1100 de marca Draco. filler calizo de Flowfill Cugini. Los agregados utilizados fueron: la grava (tamaño máximo 22 mm) y la arena tamizada de Holcim Gorla Minore, y arena lavada de Benedetti Giovanni.

Tabla 3.1. Diseño de mezcla del hormigón.

Componente	Cantidad	Unidad
Cemento	370	kg
Filler	150	kg
Agua	185	kg
Aditivo Plastificante	7,80	kg
Aire	0	kg
Grava	409	kg
Arena Lavada	993	kg
Arena Tamizada	244	kg

De acuerdo con la normativa italiana (UNI 11104, 2004) el material recibe la nomenclatura: Rck 35 XC3 S5. El primer término, Rck 35, indica que tiene una resistencia característica de 35 MPa. El segundo término, XC3, indica la clase de exposición o ambiente al que está diseñado (según la norma italiana UNI 11104:2004 esto quiere decir hormigón ordinario al aire libre con superficies exteriores al abrigo de la lluvia, y con corrosión inducida por carbonatación). El tercer término, S5, quiere decir una consistencia menor o igual de 220mm del cono de Abrams. Para ver todos los detalles del hormigón utilizado ver la ficha técnica en el Anejo A.

3.3.2 Fibras

Las fibras utilizadas para en la fabricación del hormigón, son de la fábrica FibrasG^R, modelo F-DUE 60/60. Están compuestas mayormente de fleje de acero con bajo contenido de carbono. Se utilizan para refuerzo estructural de hormigón y otros conglomerados de cemento, también puede usarse para uso no estructurales.

En la Tabla 3.2 se resumen gran parte de sus características geométricas de las fibras. Tienen una longitud nominal (l_f) de 60 mm, diámetro equivalente de 1.0 mm (esbeltez de 60), y forma rectilínea. No son aconsejables usar fibras con esbeltez mayor de 100, debido a los problemas que ello conlleva. Otros aspectos considerados fueron que, la longitud de la fibra sea inferior a 2/3 del diámetro de la tubería de bombeo, y se recomienda sea como mínimo 2 veces el tamaño del árido mayor.

Como se ve en la imagen de la Tabla 3.2, las fibras tienen cierto doblaje en los extremos los cuales mejoran el anclaje con el hormigón, respecto al que se produce por la fricción entre el hormigón y el acero. Para más información ver ficha técnica en Anejo B.

Tabla 3.2. Propiedades de las fibras.

Longitud (l_f)	60 mm
Diámetro Equiva. (d)	1,0 mm
Ratio l_f/d	60
Resis. a Tracción	> 1200 MPa
Límite Elástico	> 1120 MPa
Módulo Elástico	210000 MPa
N° de fibras por kg	2602
Dosis usada	35 kg/m ³



Importante destacar que se usó una dosis menor de fibras en las dos vigas preliminares, de 30 kg/m^3 . En las vigas finales se usó la dosis mostrada en la Tabla 3.2 de 35 kg/m^3 .

3.4 FABRICACIÓN DE VIGAS Y PROBETAS

En la obra el mismo momento del vaciado de la losa, y con el mismo HRFA presentado anteriormente, se fabricaron por técnicos de la UPM: 6 vigas a gran escala, 7 probetas para el ensayo a compresión simple, y 9 probetas para el ensayo a flexotracción. Con respecto a las vigas, se construyeron dos vigas preliminares con una dosificación menor de fibras (30 kg/m^3), y cuatro vigas finales en las que se usó una dosis de fibras (35 kg/m^3). Aunque las vigas preliminares también se ensayaron a flexión, no se le extrajeron testigos ni se tomaron en cuenta para el análisis de resultados.

Las dimensiones de las seis vigas son iguales, en milímetros son de $500 \times 250 \times 1500$. Puede verse más claramente en la Figura 3.3, donde también se identifican los ejes X, Y, y Z. Estos sirven de referencia para la extracción de los testigos más adelante.

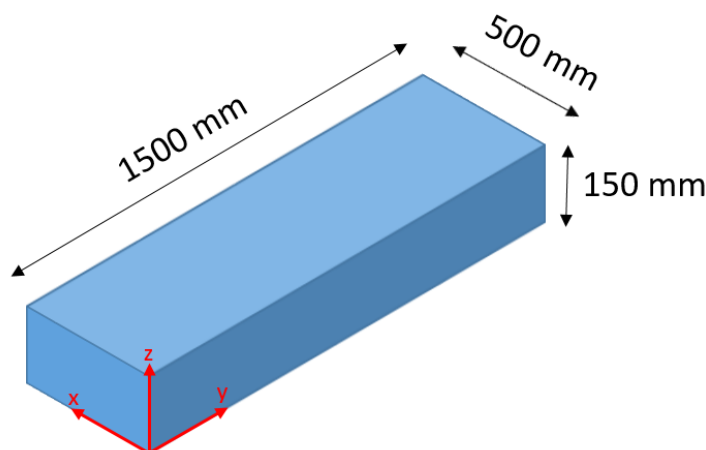


Figura 3.3. Dimensiones de vigas.

Las vigas se nombraron con letras de A hasta la F. Las vigas C y D son las vigas preliminares, y las vigas A, B, E, y F son las vigas finales. Con marcador azul o negro se escribió en un extremo de la cara frontal, la letra que identificaba la viga.

Antes de fraguar el hormigón, en la parte superior y ambos extremos, se colocaron dos anclajes de pedazos de barras dobladas. Para que, una vez endurecido el hormigón pudiera sostenerse el elemento por estos anclajes y facilitar el transporte. Este anclaje puede verse señalado en la Figura 3.4.



Figura 3.4. Anclajes para transporte de vigas.

En relación a las probetas, en la Figura 3.5 de forma esquemática, se presentan las dimensiones de estas para el ensayo a flexotracción y el ensayo a compresión simple. Las mismas, han sido fabricadas con el mismo hormigón que las vigas como se mencionó anteriormente.

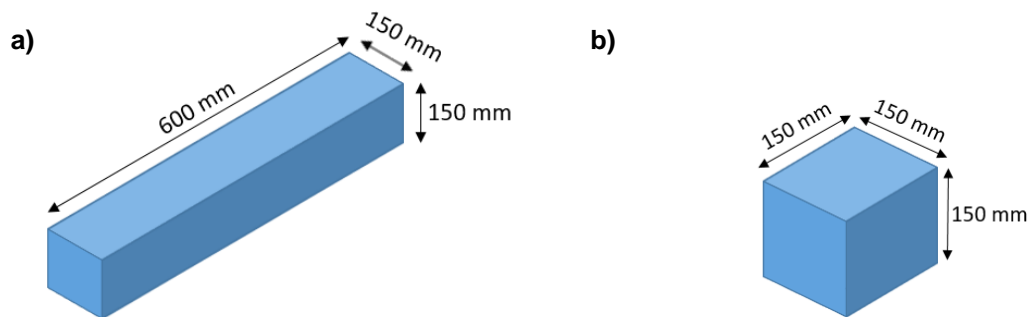


Figura 3.5. Dimensiones de probetas de ensayo a flexotracción (a) y ensayo a compresión (b).

Luego de endurecido el hormigón de las vigas y todas las probetas, se movieron al laboratorio de la Universidad Politécnica de Milán para realizar los respectivos ensayos.

3.5 ENSAYO A COMPRESION SIMPLE

El ensayo a compresión simple de hormigón es un ensayo destructivo, que proporciona el valor de la resistencia a compresión del hormigón con una gran fiabilidad, ya que es una medida directa sobre el hormigón que se está investigando. Este dato es de suma importancia para obtener la ecuación constitutiva de las vigas a escala real. Se ha utilizado los procedimientos estipulados en la norma EN 12390 (UNE 12390-3, 2003).

Para esta campaña experimental se utilizaron unas 7 probetas cubicas con unas dimensiones en milímetros de 150x150x150. Estas han sido construidas al mismo

tiempo y con el mismo material que las vigas y las muestras para el ensayo a flexotracción. Se ha proyectado que el hormigón tiene una resistencia a compresión característica de 35 MPa, el ensayo a compresión simple planea comprobar si el material cumple con este objetivo.

Antes de iniciar el ensayo se refrendan las caras de la probeta para obtener caras paralelas y planas. La máquina de ensayos consta de una prensa, constituida por dos platos de compresión, siendo el superior en que se encuentra acoplado al pistón.

El procedimiento es el siguiente: se coloca las probetas entre los platos, se enciende el equipo que comprime la muestra por medio de los platos, y se registra la carga aplicada. El ensayo termina al alcanzar la carga máxima y/o a rotura de la probeta. Para obtener la resistencia a compresión simplemente se divide la carga máxima registrada en el ensayo, y se divide entre el área de la sección transversal de la probeta.

3.6 ENSAYO A FLEXOTRACCIÓN

Generalmente, la caracterización del HRF se ha realizado mediante ensayos de flexotracción sobre probetas prismáticas. En el caso de este estudio, el ensayo a flexotracción se ha realizado siguiendo las indicaciones de la normativa EN-14651 (EN 14651, 2005). El objetivo de este ensayo es conocer la resistencia a flexotracción del hormigón, basando el estudio en la resistencia residual que se da tras la aparición de la primera fisura. Luego, se utilizan los resultados para la formulación de las ecuaciones constitutivas.

El ensayo se realiza sobre probetas de 150x150x600 mm, se han usado unas 9 probetas provenientes del mismo material que las vigas y las muestras del ensayo a compresión simple. Éstas se apoyan sobre rodillos separados a una distancia de 500 mm y se aplica la carga en el centro de vano. Además presentan una entalla de 25 mm de profundidad en el centro. Con ello se controla el lugar de aparición de la fisura y su apertura mediante el dispositivo CMOD (*Crack Mouth Opening Displacement*). Asimismo, el centro de la probeta coincide con el punto de momento máximo de una carga puntual, lo que localiza la fisura en el punto de la entalla, que además es la sección más debilitada de la probeta. Una representación esquemática del tipo de probetas y configuración del ensayo, pueden verse en la Figura 3.6.

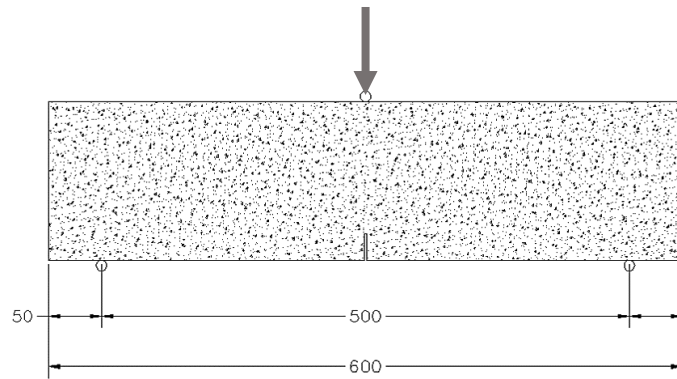


Figura 3.6. Configuración del ensayo a flexotracción.

En primer lugar, el ensayo requiere la ejecución de una entalla en la sección de centro de vano de cada viga. De este modo se obtiene una sección más débil en el centro de vano, dónde además se producirá el momento flector máximo que producirá la fisuración de la viga. Dicha entalla debe realizarse por un método de aserrado por vía húmeda. Ésta debe realizarse en cualquiera de las dos caras adyacentes a la cara de hormigonado. De este modo, en la configuración del ensayo la probeta apoya sobre la cara entallada y la carga se aplica sobre una cara lisa.

La normativa especifica unas dimensiones concretas para el corte de la probeta, si bien no es la entalla la que debe tener una longitud determinada, sino el canto útil tras la realización del corte. Para ello, debe realizarse una entalla de anchura igual o inferior a 5 milímetros y de una longitud tal que el canto útil de la probeta en la sección del centro de vano sea de 125 ± 1 mm. Tras haber realizado las entallas en las probetas, se procede a la preparación de las mismas con el objetivo de realizar el ensayo a flexotracción. Este procedimiento consiste en tomar las dimensiones de las secciones de la probeta, la unión de dos láminas biseladas, la colocación del dispositivo transductor de desplazamiento y la colocación de la probeta en el equipo.

El equipo para la realización del ensayo controla la aplicación de la carga a través de la velocidad de crecimiento del CMOD. Así, la máquina debe funcionar de modo que el CMOD aumente a una velocidad constante de 0,05 mm/min. Alcanzado el punto en que el CMOD = 0,1 mm, la máquina debe funcionar de modo que el CMOD aumente a una velocidad constante de 0,2 mm/min.

Los rodillos inferiores de apoyo están separados a una distancia de 500 mm y el rodillo superior se sitúa en el centro de luz. Dos de los rodillos, uno inferior y el superior, tienen capacidad para girar libremente. La probeta debe colocarse de modo que la cara de hormigonado quede orientada hacia un lateral. De este modo, las caras que reposan sobre los rodillos corresponden a caras en contacto con el molde de fabricación de la

probeta, siendo éstas completamente lisas. El ensayo de la probeta finaliza en alcanzar una apertura del dispositivo CMOD igual o superior a 4,0 mm.

3.7 ENSAYO A ESCALA REAL DE VIGAS

Como se mencionó anteriormente, el ensayo a escala real a flexión de las vigas se llevó a cabo en los laboratorios de la UPM. Este trabajo se realizó en dos días, por lo que se ensayaron tres vigas el 01 de abril de 2015, y las otras tres el 03 de abril de 2015.

El objetivo de este ensayo es conocer la resistencia a flexotracción del elemento, basando el estudio en la resistencia residual que se da tras la aparición de la primera fisura, en elementos estructurales de grandes dimensiones. Para la realización del ensayo se ha utilizado la configuración a flexión por 4 puntos, se colocan las vigas en dos rodillos que funcionan como apoyos, y se aplica carga por medio de otros dos rodillos más equidistantes a los apoyos. Este ensayo se puede llamar comúnmente como 4pb, viene de sus siglas en inglés *four point bending test*.

Algunos aspectos como la velocidad de carga, colocación de los equipos de medición, entre otros, se ha utilizado la norma EN 14488 (UNE-EN 14488-3, 2007) como referencia. En esta norma se explica un ensayo a flexión 4pb para caracterización de hormigón, básicamente se ha realizado un procedimiento similar al estipulado en la norma, pero llevado a una mayor escala.

Este ensayo a escala real básicamente ha consistido en, especímenes de haz prismáticas (las vigas) sujetas a un momento flector. Por la aplicación de carga a través de rodillos superiores e inferiores bajo el control de la deflexión o de la abertura de fisura (COD, por sus siglas en inglés), para obtener la respuesta de la viga carga/deflexión y carga/COD. El primer pico y máximo, las cargas residuales sostenidas se registran, y las correspondientes resistencias a flexión son calculadas. En la Figura 3.7 puede verse un esquema de cómo fue realizado el ensayo.

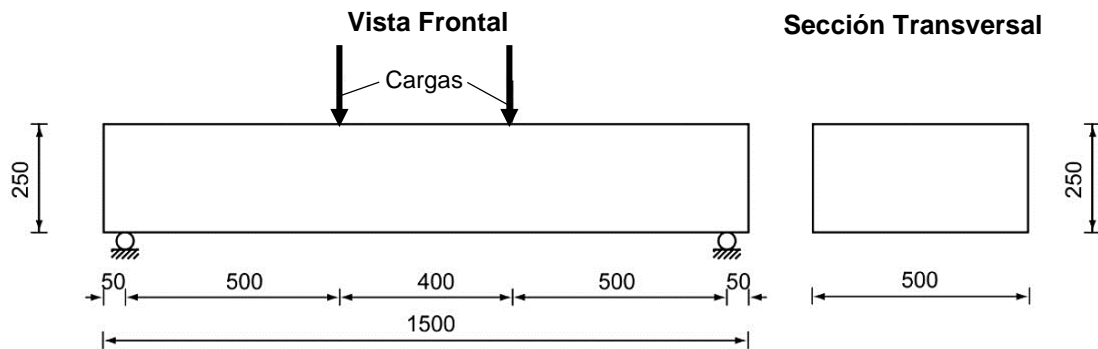


Figura 3.7. Esquema de ensayo a flexión a escala real (unidades en mm).

Según los procedimientos normativos (UNE-EN 14488-3, 2007), debe estar limpio tanto el espécimen a ensayar como el equipo, en especial la zona donde están los rodillos que soportan y cargan la viga. Con el motivo de evitar movimientos y resultados no esperados del espécimen. Luego se coloca el espécimen centrado en la máquina. En este caso, se ensayaron las vigas en su eje más débil como puede verse en la Figura 3.7.

Con respecto al equipo de aplicación de la carga, básicamente consiste en cuatro rodillos: dos que soportan la viga en la parte inferior, y dos rodillos superiores sostenidos por un miembro transversal articulado, que divide la carga aplicada por la máquina en partes iguales entre los dos rodillos. Estos rodillos son de acero con una sección transversal circular, y tres de estos (incluyendo los dos superiores) deben ser capaces de rotar libremente sobre sus ejes. Estos deben de estar también sin inclinación alguna, en el mismo plano que la viga.

Luego se colocan los demás componentes, como los sensores de medición de deflexión y abertura de fisura (COD). Se procede a cargar la viga a una tasa constante de deflexión en la mitad del elemento de $0,25 \pm 0,05$ mm por minuto hasta alcanzar una deflexión de 0,5 mm. Después de este punto la tasa de deflexión puede ser incrementada a 1,0 mm por minuto. El ensayo debe pararse cuando en el centro de la viga la deformación exceda 4 mm, o la fractura del elemento. Una computadora conectada al equipo registra y guarda los resultados del ensayo. En la Figura 3.8 se presentan algunas imágenes durante la realización del ensayo, señalando algunos componentes del equipo.

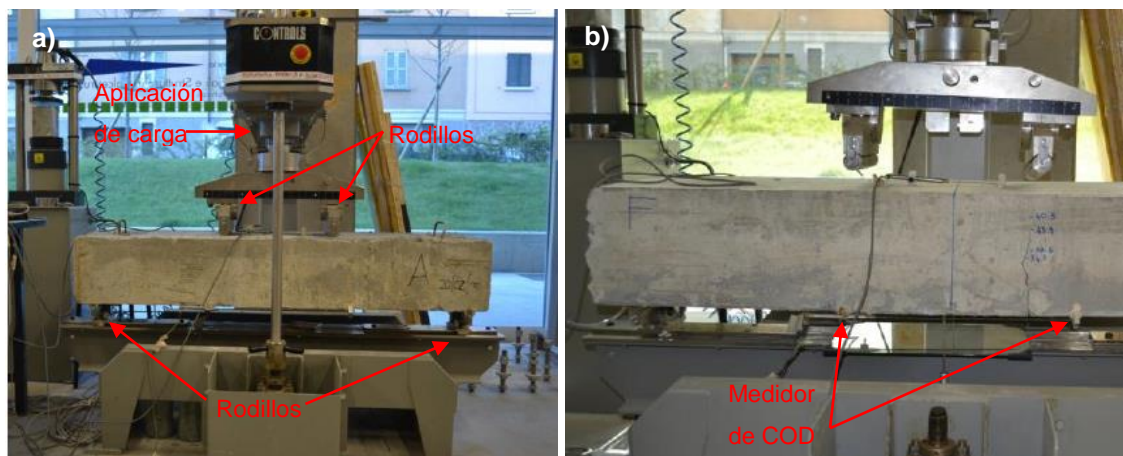


Figura 3.8. Ensayo a escala real 4pb de Viga A y Viga F.

Nótese que las vigas E y F se ensayaron giradas 180° a lo largo del eje horizontal, esto es una forma de ver si el hormigón en la parte inferior se comporta igual al de la parte superior de la viga, que es lo que teóricamente se espera. En capítulos siguientes, donde se presentaran los resultados, se comprueba que esto no ha sido un factor importante en las conclusiones.

3.8 EXTRACCIÓN DE TESTIGOS

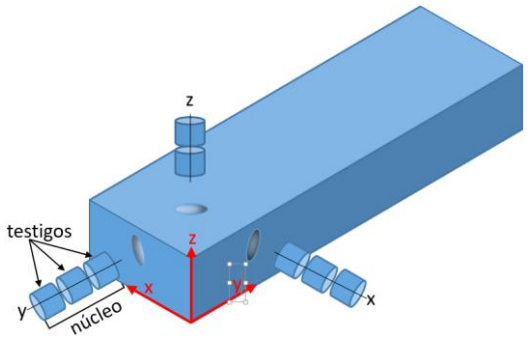
Después de realizado todos los ensayos a escala real con éxito, de las vigas finales (A, B, E, F) se procedió a sacar los testigos. Este trabajo fue hecho por técnicos italianos, en los laboratorios de la UPM, los cuales al finalizar enviaron los testigos por correo a la UPC para continuar con la campaña experimental.

De estas cuatro vigas se extrajo un total de 136 probetas, las cuales 56 de estas se utilizaron en esta investigación, las restantes se utilizaron para otros estudios independientes a este. Se extrajeron probetas en todos los ejes de las vigas, pero no se marcó en las probetas la orientación exacta de las mismas en el elemento. Por lo que solo se conoce la procedencia con respecto a un solo eje de la viga de todos los testigos.

En la Tabla 3.3 puede analizarse más fácilmente la cantidad y posición de los testigos extraídos por viga, eje y altura. En esta tabla también se presenta un esquema que muestra la cantidad de testigos por núcleo, dependiendo del eje de extracción. Como puede apreciarse en la figura, los núcleos extraídos en el eje X y Y proporcionan tres testigos, mientras de los extraídos en el eje Z se obtienen 2 testigos.

Tabla 3.3. Cantidad de testigos.

Viga	Altura	X	Z	Y	Total
A	Superior	3	0	3	6
	Inferior	3	0	3	6
B	Superior	3	0	3	6
	Inferior	3	0	3	6
E	Superior	0	8	0	8
	Inferior	0	8	0	8
F	Superior	0	8	0	8
	Inferior	0	8	0	8
Total		12	32	12	56



Como puede verse en la tabla anterior, de las vigas A y B se extrajeron testigos en el eje X y en el eje Y. De las vigas E y F solo se extrajeron del eje Z. En todas las vigas, se tomaron testigos a alturas y profundidades.

Los testigos de HRFA se extrajeron con una cortadora especializada para este fin. El equipo utilizado tiene la capacidad de penetrar en los especímenes más de 300 mm con un diámetro de 100 mm, por lo que en cada penetración se extraía suficiente material para hacer dos o tres probetas dependiendo del plano que perforaba como se ha mencionado anteriormente. Luego de que el equipo de perforación sacaba el material, este se cortaba en partes de 100 mm, y se cortaban los extremos para asegurar una superficie regular en todos los testigos. Luego de esto, quedaron los testigos con las condiciones mostradas en la Figura 3.9.

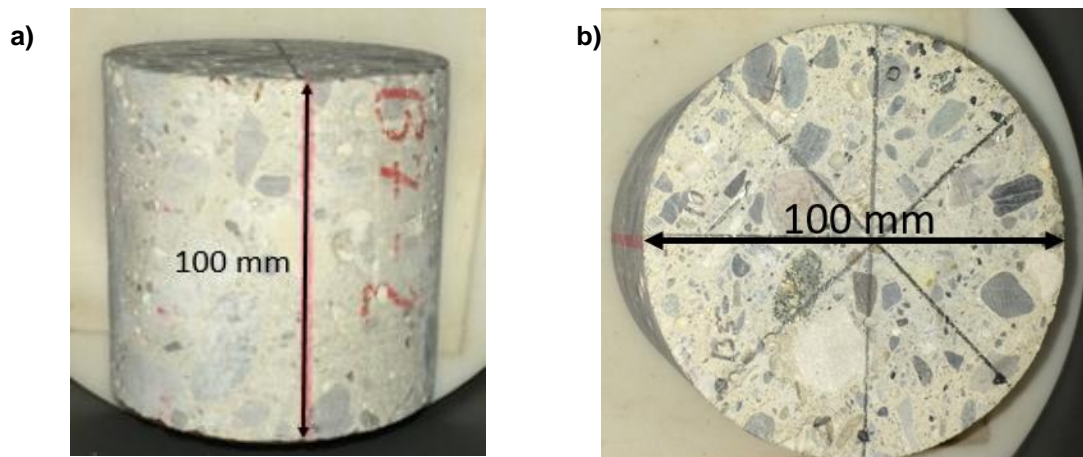


Figura 3.9. Dimensiones de testigos.

Extraídos y cortados los testigos se marcaron con un código alfanumérico que se explica a continuación: la primera parte es una letra que indica de la viga en que fue extraído, la segunda parte indica una posición específica en la viga, y la tercera parte indica una profundidad (1, 2, 3, siendo la más profunda 3) para el caso de las vigas A y

B o una altura (B es inferior, T es superior) en el caso de las vigas E y F. En la Tabla 3.4 se presentan todos los testigos nombrados por código y su referencia en la viga.

Tabla 3.4. Testigos por viga, eje, y altura de extracción.

Viga	Código	Eje	Altura	Viga	Código	Eje	Altura
A	A10-1	Y	Inf.	B	B10-1	Y	Inf.
	A10-2	Y	Inf.		B10-2	Y	Inf.
	A10-3	Y	Inf.		B10-3	Y	Inf.
	A1-1	X	Sup.		B1-1	X	Inf.
	A1-2	X	Sup.		B1-2	X	Inf.
	A1-3	X	Sup.		B1-3	X	Inf.
	A4-1	X	Inf.		B4-1	X	Sup.
	A4-2	X	Inf.		B4-2	X	Sup.
	A4-3	X	Inf.		B4-3	X	Sup.
	A7-1	Y	Sup.		B7-1	Y	Sup.
	A7-2	Y	Sup.		B7-2	Y	Sup.
	A7-3	Y	Sup.		B7-3	Y	Sup.
Viga	Código	Eje	Altura	Viga	Código	Eje	Altura
E	E10-B	Z	Inf.	F	F10-B	Z	Inf.
	E10-T	Z	Sup.		F10-T	Z	Sup.
	E12-B	Z	Inf.		F12-B	Z	Inf.
	E12-T	Z	Sup.		F12-T	Z	Sup.
	E13-B	Z	Inf.		F13-B	Z	Inf.
	E13-T	Z	Sup.		F13-T	Z	Sup.
	E15-B	Z	Inf.		F15-B	Z	Inf.
	E15-T	Z	Sup.		F15-T	Z	Sup.
	E1-B	Z	Inf.		F1-B	Z	Inf.
	E1-T	Z	Sup.		F1-T	Z	Sup.
	E3-B	Z	Inf.		F3-B	Z	Inf.
	E3-T	Z	Sup.		F3-T	Z	Sup.
	E6-B	Z	Inf.		F6-B	Z	Inf.
	E6-T	Z	Sup.		F6-T	Z	Sup.
	E8-B	Z	Inf.		F8-B	Z	Inf.
	E8-T	Z	Sup.		F8-T	Z	Sup.

En las Figura 3.10 hasta Figura 3.13 se presentan en detalle la ubicación de cada testigo en las cuatro vigas.

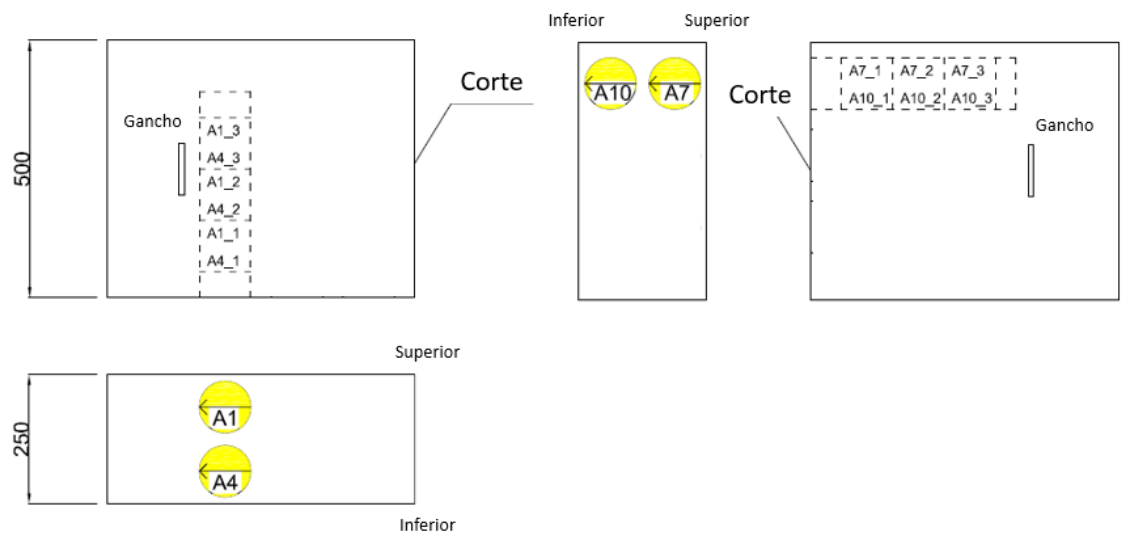


Figura 3.10. Testigos de viga A.

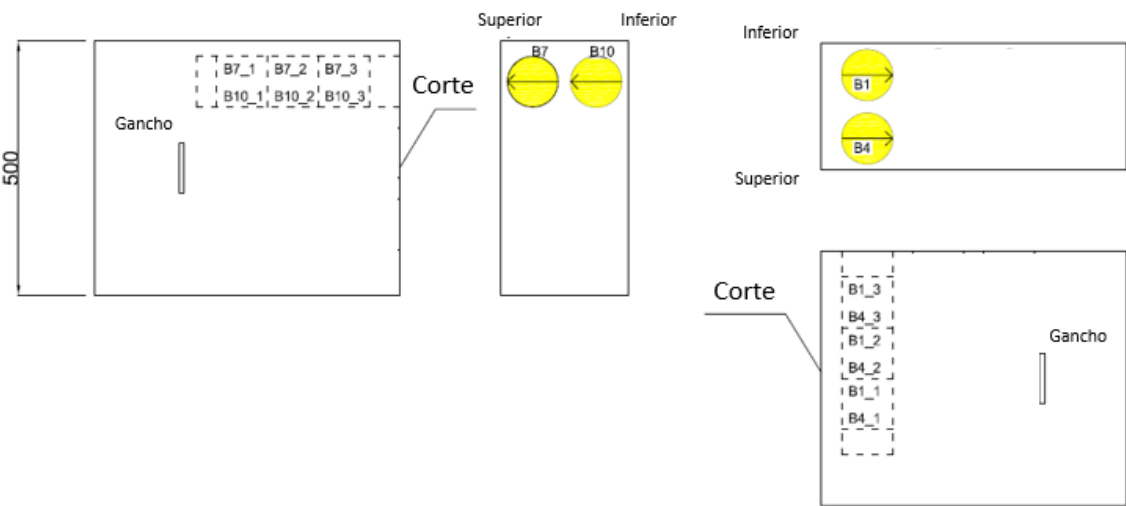


Figura 3.11. Testigos de viga B.

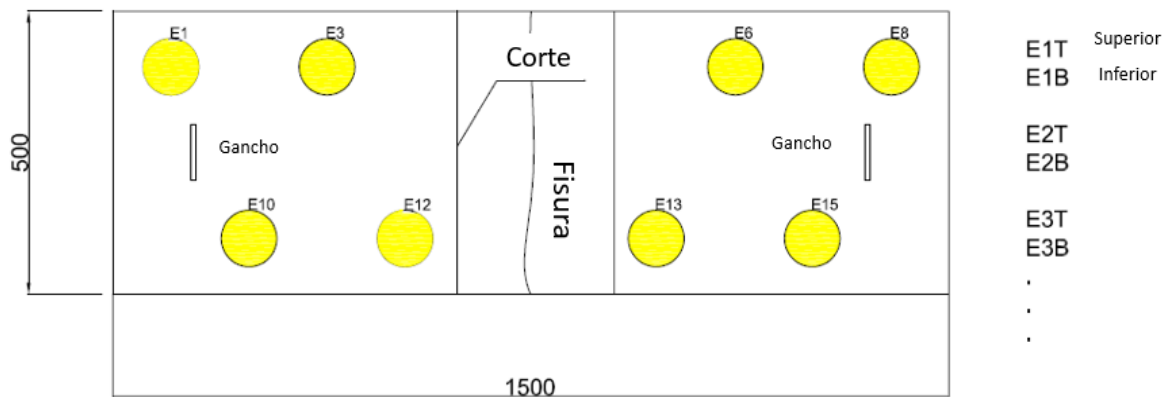


Figura 3.12. Testigos de viga E.

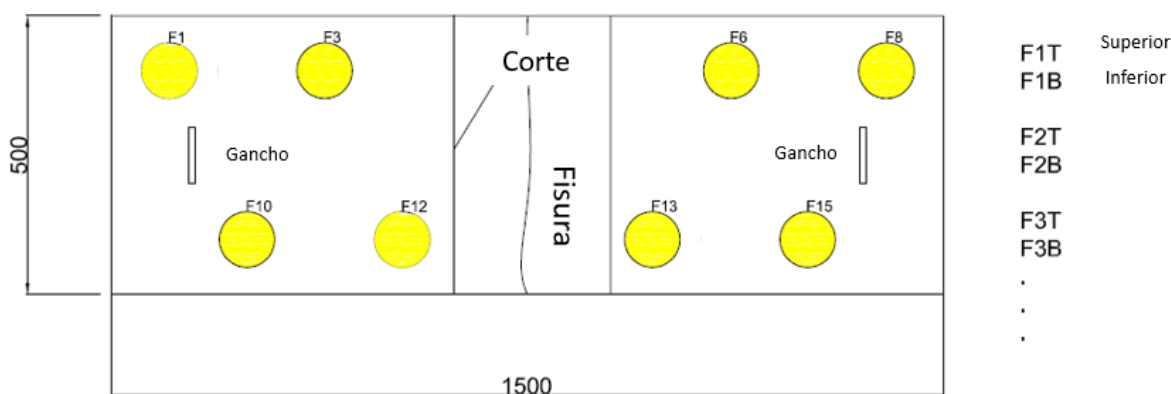


Figura 3.13. Testigos de Viga F.

Luego de extraídos y marcados los testigos, estos procedieron a guardarse en una caja de madera para enviarlos de forma segura, al Laboratorio de Tecnología de Estructuras de la UPC Barcelona.

3.9 ENSAYO INDUCTIVO

La realización de los ensayos de inducción tiene como objetivo conocer la orientación de las fibras en el interior del hormigón. Las fibras metálicas tienen capacidad de alterar el campo magnético de su alrededor, por lo que el empleo de una bobina inductiva permitiría determinar dicha orientación. Asimismo, la inductancia también se ve influenciada por la orientación del campo magnético respecto a la orientación de las fibras. Por ello, cuando el eje del campo magnético está alineado con la dirección media de las fibras, la inductancia medida es máxima (Ferrara et al., 2012). Así, la orientación de las fibras en el interior de las probetas se deduce a partir de la dispersión en las mediciones sobre los ejes de la probeta.

Los testigos llegaron intactos a los laboratorios de la UPC, como puede verse en la Figura 3.14.a. Una vez con los permisos requeridos para el uso de las instalaciones, se procedió con la campaña experimental dentro de este laboratorio. Para empezar se procedió a marcar en todas las probetas en su cara superior, con ejes a ángulos de 0°, 45°, 90°, 135°. Los especímenes fueron extraídos de las vigas sin considerar su orientación en el elemento, por lo que estos ejes marcados no representan ningún eje de la viga en sí (Figura 3.14.b).

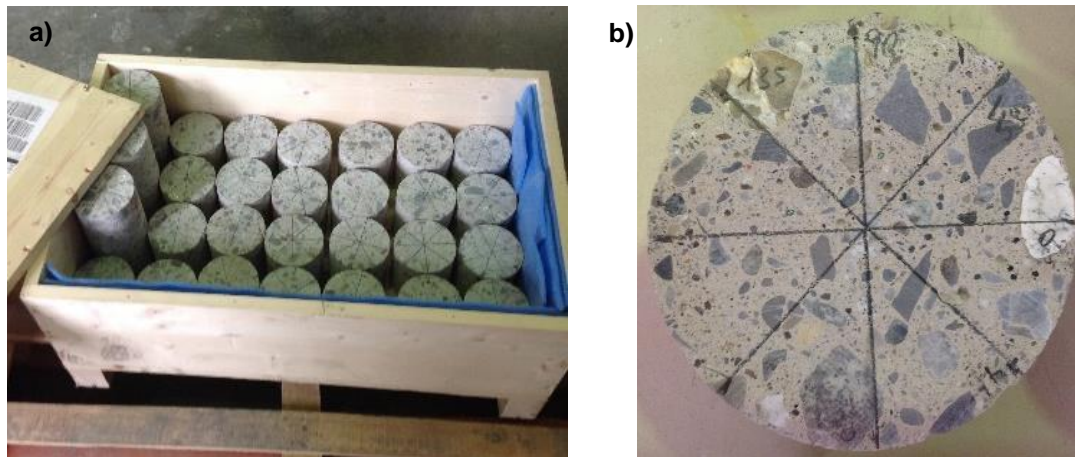


Figura 3.14. Especímenes al llegar a la UPC.

El sistema empleado para el método inductivo constaba básicamente de dos partes: un equipo de medición LCR y la bobina circular, como puede verse en la Figura 3.15. Ambos componentes están unidos mediante un cable diseñado especialmente con esta finalidad.

La bobina circular se trataba de una bobina tipo Helmholtz de 25 cm de diámetro, con doble arrollamiento de espiras. Fue especialmente diseñada para ensayar probetas cúbicas de 15 cm y cilíndricas de $\Phi 15 \times 15$ cm, maximizando la uniformidad de campo magnético en su interior. Las medidas de la inductancia se realizaron con un medidor LCR de la marca AGILENT y modelo 4263B. El equipo era capaz de medir la inductancia, la capacidad y la resistencia eléctrica, así como abastecer a las bobinas de corriente eléctrica.

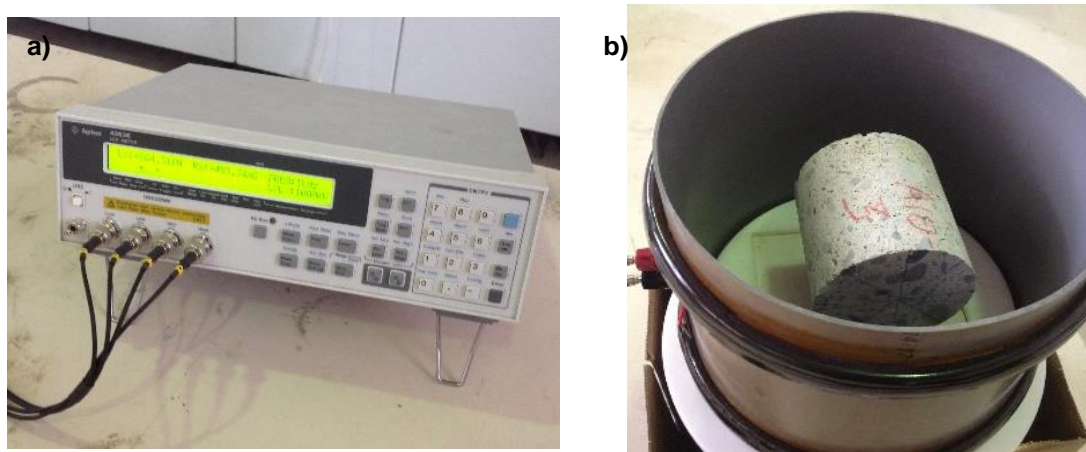


Figura 3.15. Equipos de medición de inductancia.

Para realizar las medidas el equipo se configuró para que la corriente eléctrica fuese alterna, con una frecuencia de 1 kHz y un voltaje de 1 V. Además, fue configurado

para que los valores mostrados fuesen un promedio de 5 medidas. De esta manera se reducía la posibilidad de cometer un error en la lectura.

Para obtener una correcta medición, es importante ubicar la probeta lo más centrada posible en la bobina, tanto en altura como en el plano perpendicular. Debe tenerse cuidado también de no tener objetos metálicos cerca de la bobina, ni siquiera el equipo de medición LCR, ya que estos pueden alterar el campo magnético, y así la medición.

Como el equipo es capaz de reflejar dos valores por medición, se configuró de forma que aportase los valores de la inductancia y la resistencia eléctrica. Aunque éste segundo parámetro no resulte necesario específicamente, se aprovechó para anotarlo por si es necesario en análisis futuros. Los valores de inductancia y resistencia fueron apuntados directamente en el portátil, en una hoja de cálculo. Este se encontraba a cierta distancia de la bobina para no adulterar la medición.

El ensayo consiste en un sencillo procedimiento. La probeta a estudiar se apoya sobre una superficie no metálica y se sitúa la bobina de modo que la probeta quede envuelta por ésta, como muestra la Figura 3.15.b. Así, el equipo de lectura de impedancia muestra el valor de la inductancia generada por la bobina. El mismo procedimiento se repite para los demás ejes de la probeta, obteniendo los resultados de inductancia en las tres direcciones de la probeta.

Se midieron las 56 probetas, cada una en su eje (eje Z del testigo) y en los cuatro ejes perpendiculares marcados. Para asegurarse que las mediciones fueran correctas, se calculó teóricamente el valor de inductancia del eje 135°, si este coincidía con un error menor del 5% con la inductancia medida de este mismo eje, se consideraba correcta la medición. Esto no ocurrió en 8 de las 56 probetas, por lo que procedieron a medirse nuevamente el 12 de junio de 2015. Estos resultados si se encontraban con un error menor del 5% por lo que se consideraron correctos, y no hubo necesidad de volver a medir más testigos.

3.10 ENSAYO BARCELONA

El ensayo Barcelona de doble punzonamiento, tiene por objeto determinar la resistencia a primera fisura, tenacidad y resistencia residual a tracción indirecta del FRC sobre una probeta cilíndrica de igual diámetro que altura (100 mm) que se somete a un ensayo de doble punzonamiento mediante una carga transmitida según el eje central de simetría de la misma. Al cargar la probeta se genera un estado triaxial bajo el disco de

carga y una tracción perpendicular a los planos que contienen el eje de simetría de la probeta, lo que permite obtener un valor de resistencia a tracción (Saludes, 2007).

Con todas las medidas de inductancia realizadas correctamente, se procedió con los ensayos Barcelona. Se ensayaron los 56 testigos para determinar la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción. Para la realización de este ensayo se siguieron los pasos propuestos en la norma española UNE 83515 (UNE 83515, 2010).

El ensayo consiste básicamente en dos punzones cilíndricos de acero de 25 mm de diámetro dispuestos concéntricamente encima y debajo de la probeta, transmiten la carga aplicada por los platos de la prensa que se acercan a una velocidad de desplazamiento relativa de 0,5 mm/min. Ello genera unas tensiones de tracción concéntricas, desde el eje de la probeta hacia el exterior de la misma, que al alcanzar la resistencia a tracción del hormigón producen la rotura de la probeta según los planos de fisuración radial. La Figura 3.16 puede verse la configuración del ensayo en uno de los testigos.

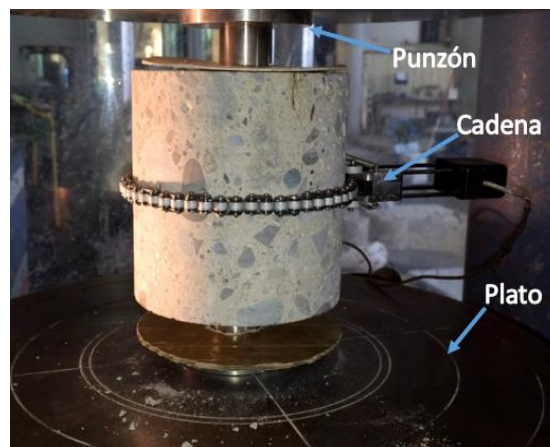


Figura 3.16. Configuración del ensayo a Barcelona.

Debe tenerse cuidado con la colocación de la probeta y los punzones, estos deben estar totalmente centrados entre sí y con los platos de la prensa, para evitar desplazamientos de la probeta durante el ensayo y generar resultados incorrectos. Para asegurar el centrado de los punzones sobre la probeta se utilizaron como plantillas discos de cartón agujereado, con diámetro exterior igual al de la probeta y un diámetro interior al punzón. Esto fue de gran ayuda para la manipulación de las probetas y reducir el riesgo de errores de este tipo.

Generalmente, suelen aparecer tres fisuras radiales en la muestra ensayada, si bien en la práctica se observa la aparición de dos o más fisuras. Bajo la carga de rotura,

se forman además dos cuñas cónicas que se sitúan bajo los punzones, estas se procederán a medir más adelante en esta campaña experimental. Durante el ensayo se registra la carga aplicada, deformación del pistón, y el TCOD mediante una cadena extensométrica instalada a media altura del espécimen. El ensayo se considera finalizado cuando la deformación circunferencial total desde el inicio del ensayo alcance los 6,0 mm.

3.11 MAPA DE FISURAS

Para mantener un registro de la forma en que han fallado todas las probetas al finalizar el ensayo Barcelona para análisis posteriores, se ha procedido hacer un mapa de fisura a todas las probetas ensayadas. Este consiste en dibujar las fisuras en un dibujo a escala de la probeta.

Para esto se utilizó una cinta métrica común para medir a que distancia se encontraba la fisura del eje 0° en todos los planos (lateral, cara superior e inferior), de esta forma se ubicaban las fisuras para luego dibujarlas correctamente en la planilla hecha para este fin. Se utilizó un pie de rey para medir con precisión el ancho de las fisuras a una altura de 5,0 cm de la base (media altura de la probeta), para distinguir la fisura mayor, de las menores. En la Figura 3.17.a puede verse la medición de una de las probetas con el pie de rey.

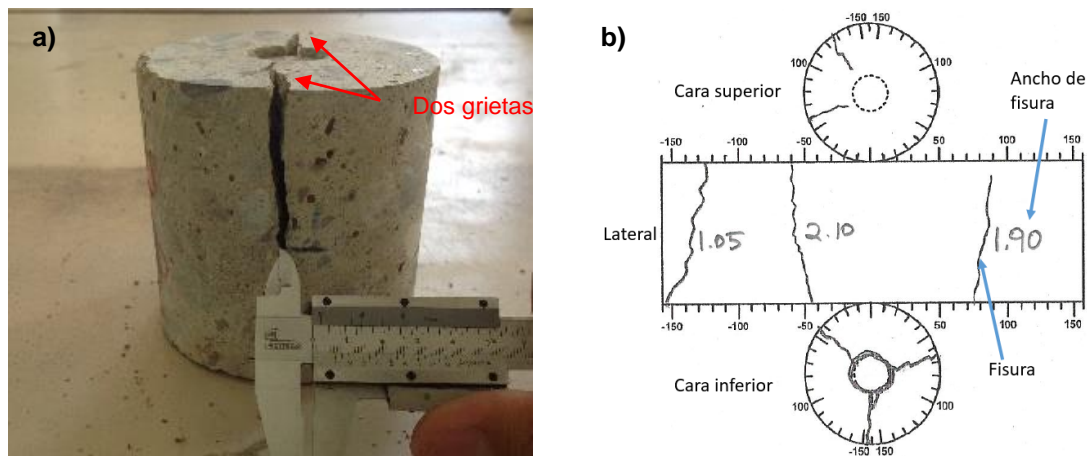


Figura 3.17. a) Medición de ancho de fisura, b) Representación bidimensional de las probetas.

En la Figura 3.17.b se presenta la planilla en que se han dibujado las fisuras, un elemento cilíndrico que es tridimensional, a una representación bidimensional. Los círculos representan la cara superior e inferior del espécimen, mientras que el rectángulo es toda la cara lateral del cilindro. El punto en que coinciden los círculos con el rectángulo representa el eje 0° marcado antes del ensayo inductivo, el signo negativo

significa que la distancia se encuentra a la izquierda del eje 0° , si es positivo denota que está a la derecha. Los números escritos a mano al lado de las fisuras representa el ancho de fisura en centímetros a media altura del espécimen. Cada unidad de medida representa 10 milímetros de longitud, tanto en las circunferencias como en el rectángulo.

En todos los especímenes se dibujó el mapa de fisuras, se contó el número de fisuras, y se midió el ancho de fisura. El único incidente ocurrido en un solo espécimen (A4-3), fue que este se había abierto totalmente luego del ensayo Barcelona por lo que no se midió su ancho de fisura. Todos los mapas de fisuras se encuentran en el Anejo C.

El modo de falla típico corresponde a la formación de dos a tres grietas radiales principales sobre las caras de carga y fisuras secundarias (Figura 3.17.a). Las grietas principales que inician en la cara de carga atraviesan toda la altura de la probeta, las secundarias presenta una longitud menor. La tendencia es la formación de dos grietas, lo cual es lo más común en probetas testigos (Aire et al., 2013).

3.12 ABERTURA DE PROBETAS

Con el objetivo de contar las fibras que cruzan las fisuras y medir las cuñas cónicas se procedió abrir algunas de las probetas. Estos datos se correlacionaran con los resultados del ensayo Barcelona con el fin de estudiar si existe alguna relación. Otro aspecto importante para abrir los testigos es, medir la cuña de penetración. La altura y los ángulos internos de la cuña, son datos necesarios para la ecuación constitutiva del ensayo Barcelona. Para estudiar estos aspectos, se han abierto ocho probetas.

Para abrir las probetas se propuso ingresar nuevamente los especímenes en la prensa con los punzones utilizados en el ensayo Barcelona, de manera que estos terminaran de fallar y se abrieran. Se colocaban los punzones en las marcas dejadas por estos, se centraba en el plato pero sin la necesidad de la precisión utilizada anteriormente para el ensayo Barcelona. Inmediatamente el espécimen se abría, se paraba la prensa y se llevaba todo el material en una bandeja. Se utilizaron cuatro probetas con esta metodología (los especímenes A4-2, B10-3, E6-B, F10-B), uno de cada viga. De esta forma se pudieron abrir las probetas con éxito, pero maltrataba la cuña cónica, en la mayoría de los casos la destruía.

Debido a esto se creó la necesidad de pensar en otra metodología, la cual no maltratara el cono de penetración. Se optó por abrir las probetas con un cincel, dando golpes suaves con una maza. Se colocaba el cincel en medio de las fisuras y se le iba

dando golpes sucesivos hasta que esta abrirá lo suficiente para abrir manualmente o con una pata de cabra pequeña. Esta metodología permitía abrir las probetas con éxito sin dañar los conos. Se abrieron otras cuatro probetas (A10-2, B4-1, E8-T, F8-B) con esta metodología. Extraído el cono se media con un pie de rey su altura, y se contaban las fibras vistas. En la Figura 3.18 aparecen imágenes de esta segunda metodología.

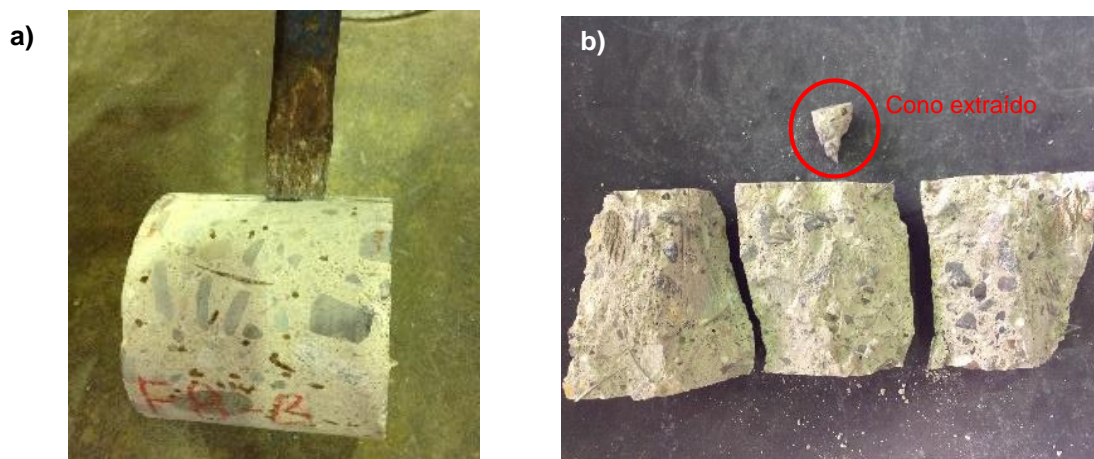


Figura 3.18. Segunda metodología para abrir probetas HRFA.

Con la primera metodología se pudo obtener el cono de un espécimen, con la segunda se consiguieron los conos de las cuatro probetas. Lo que sí se pudo lograrse es contar las fibras vistas al abrir las probetas en todos los casos. Estas se contaban manualmente y se tomaba nota para futuros análisis.

Extraídas las cuñas de penetración se procedió a medir el ángulo de falla del material (β), puede observarse que han quedado con forma irregular (Figura 3.19). Al presentar las cuñas asimetría, se han medido ambos lados. En la mayoría de los casos un lado suele dar cerca de 25° , valores recomendados en la literatura (Blanco et al., 2014; Blanco Álvarez, 2013; Molins et al., 2009; Pujadas, 2013).

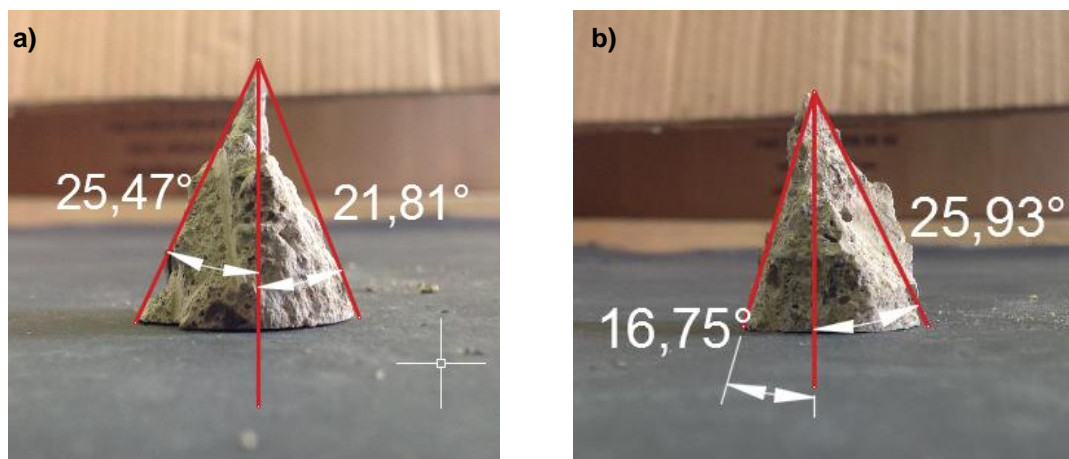


Figura 3.19. Cuñas de penetración extraídas.

Se pudo observar que no siempre se forman dos cuñas, en la mayoría de los casos los especímenes solo formaron una cuña. También la formación del cono se ve afectada, si en la superficie donde se coloca el punzón se encuentran: mucha concentración de fibras y/o árido grueso grande. Algunos ejemplos de esta observación se ilustran en la Figura 3.20.

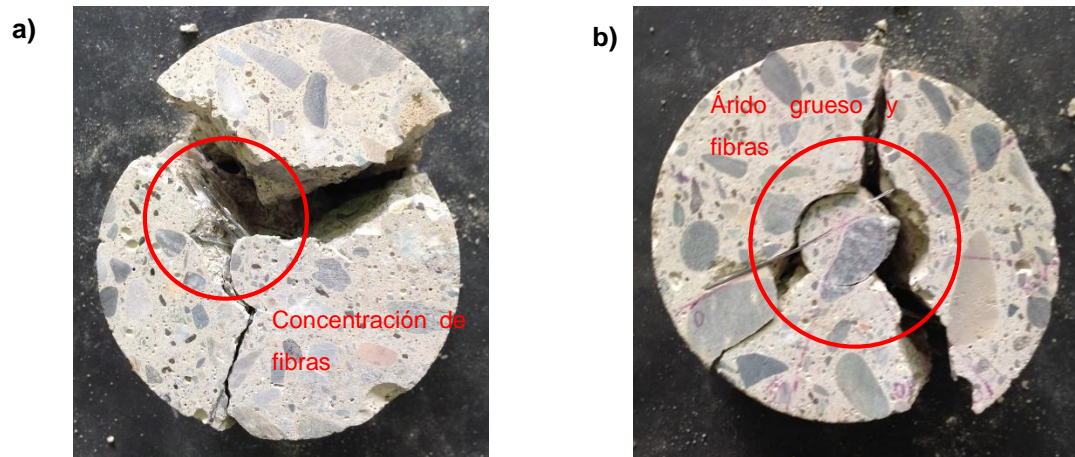


Figura 3.20. Cuñas mal formadas por concentración de fibras y/o árido grueso.

3.13 CONTEO MANUAL DE FIBRAS

Al conocer la relación entre la cantidad de fibras y la inductancia de un testigo, se infiere la cantidad de fibras de las demás probetas sin destruirlas. Para hacer la correlación entre las lecturas de inductancia con la cuantía de fibras de las probetas se hizo un recuento manual de éstas. Para ello fue necesario machacar algunas probetas, de forma que las fibras se separasen del hormigón. Se eligió una probeta de cada viga (4 probetas), con el criterio de que se encontrara dentro de los valores medios de inductancia, y que este lo menos dañada posible para asegurar que no haya perdido fibras luego de haberle realizado el ensayo Barcelona.

Se logró contar manualmente las fibras introduciendo las probetas en una machacadora de mandíbulas, la cual fragmentaba las probetas lo suficiente para separar el hormigón de las fibras. Ya con el material triturado manualmente se pasó por dos tamices encima de una bandeja para dividir el material en tres tamaños, y buscar más fácilmente las fibras.

Algunos trozos de hormigón ligeramente más voluminosos de lo deseado, o fibras con trozos de hormigón pegados, se solucionó esto dando pequeños golpes con una maza y así fragmentarlos lo suficiente. Finalmente, con el hormigón y las fibras

separados, se empleó un imán para extraer éstas últimas de la mezcla. En la Figura 3.21 pueden verse los equipos utilizados para la tarea.



Figura 3.21. Equipos utilizados para el conteo manual de fibras.

Las fibras extraídas de cada probeta machada se pesaron en una balanza con una precisión de 0,5 gramos, la cual resulta suficiente para determinar el peso de las fibras. Una vez pesadas las fibras, éstas se empaquetaron y se guardaron. En cada paquete se indicó el código de la probeta correspondiente, por si resultase necesario realizar algún tipo de comprobación. En la Figura 3.22 se presentan las fibras extraídas de cada probeta ya etiquetadas y guardadas.



Figura 3.22. Fibras etiquetadas y guardadas.

4 PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 INTRODUCCION

En el capítulo anterior han sido presentados los ensayos realizados durante la campaña experimental. La ejecución de dichos ensayos ha permitido la extracción de numerosos resultados que caracterizan el comportamiento y las propiedades del HRFA. Estos resultados deben ser tratados de un modo adecuado para poder realizar un análisis que permita extraer las conclusiones para los objetivos planteados al inicio del trabajo.

Este apartado tiene como objetivo la presentación y análisis de los resultados obtenidos. Con ello pretende conocerse que ensayo de caracterización de HRFA se ajusta más al comportamiento de las vigas por medio de las ecuaciones constitutivas. También se analizara la homogeneidad del hormigón en las vigas, por medio del ensayo inductivo y ensayo Barcelona realizado en los testigos. Algunos de estos datos se correlacionaran con, la orientación de las fisuras, cantidad de fibras que cruzan las grietas, y la cantidad total de fibras en los especímenes, con el fin de buscar alguna relación.

4.2 ENSAYO INDUCTIVO

El ensayo inductivo pretende determinar la orientación y la cantidad aproximada de fibras en el interior de los testigos. Esto facilita la comprensión del comportamiento del material, ya que estos son factores clave que caracterizan la resistencia residual del HRF.

Por medio de las mediciones de inductancia se ha calculado la orientación preferente de las fibras en cada espécimen, lo cual brinda una idea de la orientación de estas en las vigas. Para esta tarea se han utilizado las formulas propuestas en investigaciones de la UPC (Cavalero et al., 2015). A continuación se presentan las fórmulas utilizadas, así como los resultados y conclusiones de estos.

4.2.1 Cantidad de fibras en testigos

Para saber la cantidad aproximada de fibras en cada espécimen, se utilizaran los datos del conteo manual de fibras y las mediciones de inductancia. Se utiliza una regresión lineal, con la cantidad de fibras obtenidas de los especímenes machacados (en gramos) y los valores de la suma de sus inductancias (ejes Z, 0°, y 90°). Obtenida la ecuación se calcula la cantidad de fibra en los demás especímenes.

En la Figura 4.1 se presenta la linealidad entre peso de fibras y la inductancia total de los testigos, estos resultados arrojan una función lineal representada con la ecuación $y = 11,13x - 0,1023$. Obtenida la ecuación se calcula la cantidad de fibras de cada testigo para tener en cuenta este factor en otros análisis.

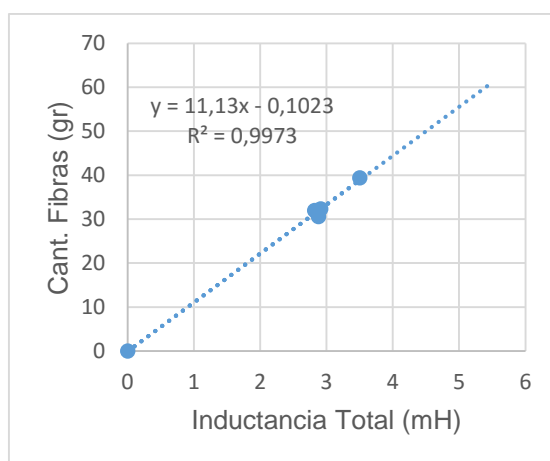


Figura 4.1. Regresión lineal de fibras/inductancia.

Se observa que la inductancia media y la cuantía de fibras presentan una relación lineal con un coeficiente de determinación $R^2=0,9973$. Un coeficiente de esta magnitud muestra una fuerte relación existente entre ambos parámetros. Además la

recta obtenida ha sido ajustada de modo que la intersección con los ejes se produzca en el origen de coordenadas. Esto se explica debido a que la ausencia de fibras produce que la inductancia sea casi nula en cualquier eje de medición.

Utilizando la ecuación obtenida anteriormente se obtiene la cantidad de fibras en cada testigo, al dividir esta por el volumen del testigo se obtiene la dosificación de fibras. En la Figura 4.2 se presenta la dosificación de cada testigo en kg/m^3 , en su respectiva posición en la viga. Las magnitudes en azul indica la dosificación del testigo superior, mientras que las que se encuentran en rojo indican la del testigo inferior. Nótese que los testigos en la parte inferior de las vigas suelen contener mayor dosificación de fibras. En el 80% de los casos el testigo inferior tiene una cantidad de fibras mayor al testigo superior, con una diferencia porcentual promedio de 20%. Más adelante se estudia si esto tiene alguna incidencia con los resultados del ensayo Barcelona.

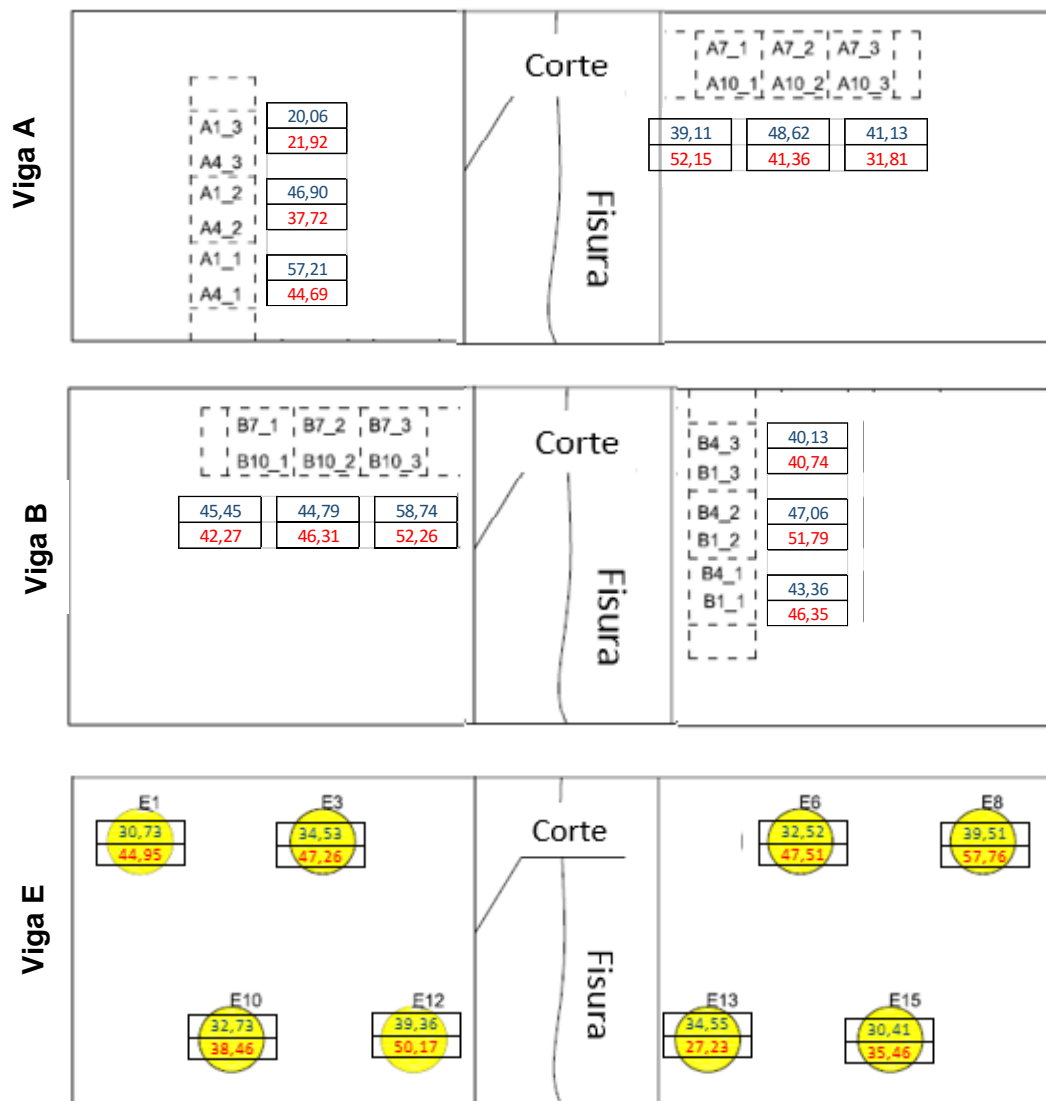




Figura 4.2. Dosificación de fibras (en kg/m³) por testigos y vigas.

En la Tabla 4.1 los se muestra la dosificación de fibras promedio y la desviación media de los testigos, con relación a la viga en que fueron extraídos.

Tabla 4.1. Dosificación de fibras promedio por viga.

Código	Dosif. Fibras Promedio (kg/m³)	Desviación Media (kg/m³)	Coficiente de Variación (%)
Viga A	40,22	8,42	20,92
Viga B	46,36	4,07	8,8
Viga E	40,40	6,29	15,57
Viga F	36,99	5,13	13,87
Prom.	40,99	5,98	14,58

En todos los casos se obtiene una dosificación mayor a la esperada de 35 kg/m³. La viga A y viga E tienen valores similares de dosificación de fibras, pero la viga A tiene una desviación media mayor, por lo que indica una distribución menos homogénea de las fibras en el elemento. Los especímenes de la viga B muestran la mayor dosificación de fibras promedio y con el menor coeficiente de variación, dando a entender que posee un material más homogéneo y con mayor cantidad de fibras, esta puede ser la razón principal por la cual esta viga ha alcanzado resistencias mayores que las demás en el ensayo a flexión, como se estudiara más adelante.

4.2.2 Contribución de fibras en testigos

Con el objetivo de conocer la dirección de las fibras en las vigas, se calcula el número de orientación (Ecuación 4.1) y de la contribución de las fibras en cada eje (Ecuación 4.2) de los testigos.

$$\eta_i = 1.03 \sqrt{\frac{L_i(1 + 2\gamma) - L_e B_{V,i} \gamma}{L_e B_{V,i}(1 - \gamma)}} - 0.085 \quad 4.1$$

$$C_i = \frac{\eta_i}{\sum_{i=x,y,z} \eta_i} \quad 4.2$$

Estas fórmulas proporcionan una medida en por ciento de la orientación de las fibras en tres ejes ortogonales. En este caso los ejes de la viga y los ejes marcados en los testigos no coinciden, ya que estos últimos fueron extraídos sin tener en cuenta su orientación en el elemento. De todas formas, si se calcula la contribución de las fibras en el eje longitudinal de los testigos (el eje Z del testigo) tendremos una idea de la orientación preferente en las vigas, ya que este si coinciden con los ejes de las vigas. Atendiendo a esto, se presenta la Figura 4.3 la cual muestra la contribución de las fibras en el eje longitudinal de los testigos extraídos en el eje X, Y, y Z de la viga.

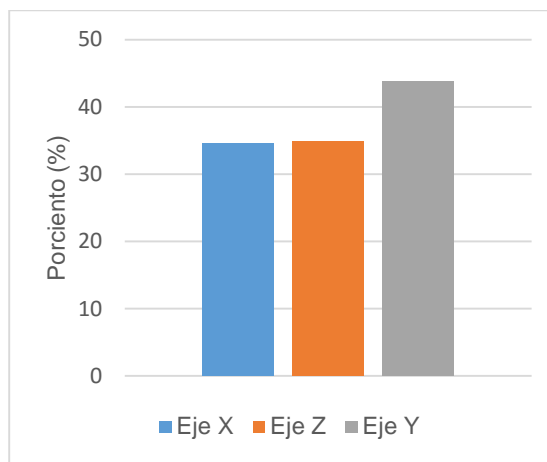


Figura 4.3. Contribución de fibras en eje longitudinal de los testigos.

Como puede verse en la gráfica anterior, los testigos extraídos en el eje Y tienen en promedio un 44% de contribución de fibras en su eje longitudinal, mientras los testigos extraídos en los ejes X e Z ambos muestran un 35%. Esto evidencia que existe una orientación preferente de las fibras al eje Y de las vigas. Esta es fruto del efecto pared que alinea las fibras paralelamente al encofrado, y también por las líneas de flujo que se producen durante el vertido del material que condiciona la disposición de las fibras

4.2.3 Orientación de las fibras en testigos

Al no tener los ejes de los testigos referenciados a ejes de las vigas, se estudiara también los cambios de inductancia en el plano perpendicular de los especímenes. Ya que la inductancia es directamente proporcional a la orientación de las fibras en el plano. Para esto se utilizan las formulas a continuación, las cuales sirven para calcular la orientación preferente y el valor de la inductancia en cualquier plano.

$$L_{ani} = \frac{1}{1 - \gamma} \sqrt{(L_{0^\circ} - L_{90^\circ})^2 + (L_{0^\circ} + L_{90^\circ} - 2L_{45^\circ})^2} \quad 4.3$$

$$L_{iso} = \frac{L_{0^\circ} + L_{90^\circ} - L_{ani}(1 + \gamma)}{2} \quad 4.4$$

$$\theta_{max} = \pm \frac{1}{2} \arccos \left[\frac{L_{0^\circ} - L_{90^\circ}}{L_{ani}(1 - \gamma)} \right] \quad 4.5$$

$$\theta_{min} = \theta_{max} - 90^\circ \quad 4.6$$

Donde $L_{\#^\circ}$ es la inductancia en el eje señalado en las formulas, γ es el coeficiente de forma, θ_{max} y θ_{min} es la orientación en que más y menos influyen las fibras respectivamente. Téngase en cuenta que las únicas incógnitas que deben ser encontradas para obtener el cambio en la inductancia son L_{iso} , L_{ani} y θ_{max} , que será constante para cada espécimen. La formulación para la evaluación de θ_{max} tiene un signo inicial de que podría ser positivo o negativo dado que los dos ángulos satisfacen el arco coseno. Otra observación de esta formulación es que, el máximo y el mínimo valor de la inductancia deben estar separados por 90° .

Con estos datos no solo se conoce la orientación preferente en el plano perpendicular de la probeta (θ_{max}), también se puede obtener el valor de la inductancia en cualquier ángulo de este plano. Para esto se utiliza la Ecuación 4.7.

$$L_\theta = L_{iso} + L_{ani} \cdot [\gamma + (1 - \gamma) \cdot \cos^2(\theta - \theta_{max})] \quad 4.7$$

Conocer la inductancia en cualquier plano perpendicular al de la probeta, ayuda a entender mejor la orientación de las fibras, ya que la inductancia es directamente proporcional a la orientación de las fibras en el plano. Esta fórmula permite también, crear graficas radiales de inductancia/ángulo que facilita la obtención de datos de orientación y la cantidad de fibras entre los testigos, ayudándonos así a entender mejor la distribución de las fibras en el elemento. En la Figura 4.4 se presentan algunas de las gráficas realizadas, un núcleo de cada viga, cada grafica representa un grupo de testigos del mismo núcleo. Todas las gráficas radiales se encuentran en el Anejo D. Esta metodología grafica resulta de mucha utilidad, ya que permite comparar resultados de orientación y cantidad de fibras de forma visual y rápida entre varios testigos de diferentes núcleos.

Entendiendo la distribución de las fibras en los testigos, logramos tener una idea de cómo están estas distribuidas en la viga. Por ejemplo, al ver la gráfica del núcleo A01 extraído en el eje X (Figura 4.4.a) se puede deducir que los tres testigos tienen la misma orientación preferente de fibras, probablemente sea el plano longitudinal de la viga. Pero cabe destacar que no tienen la misma cantidad de fibras ya que el área va aumentando a medida que el testigo está más cerca de la pared lateral de la viga. Esto pudiera ser

producto del efecto pared que tiende a agrupar y orientar más las fibras en el plano de la pared, y/o por la forma en que fue hormigonado el elemento.

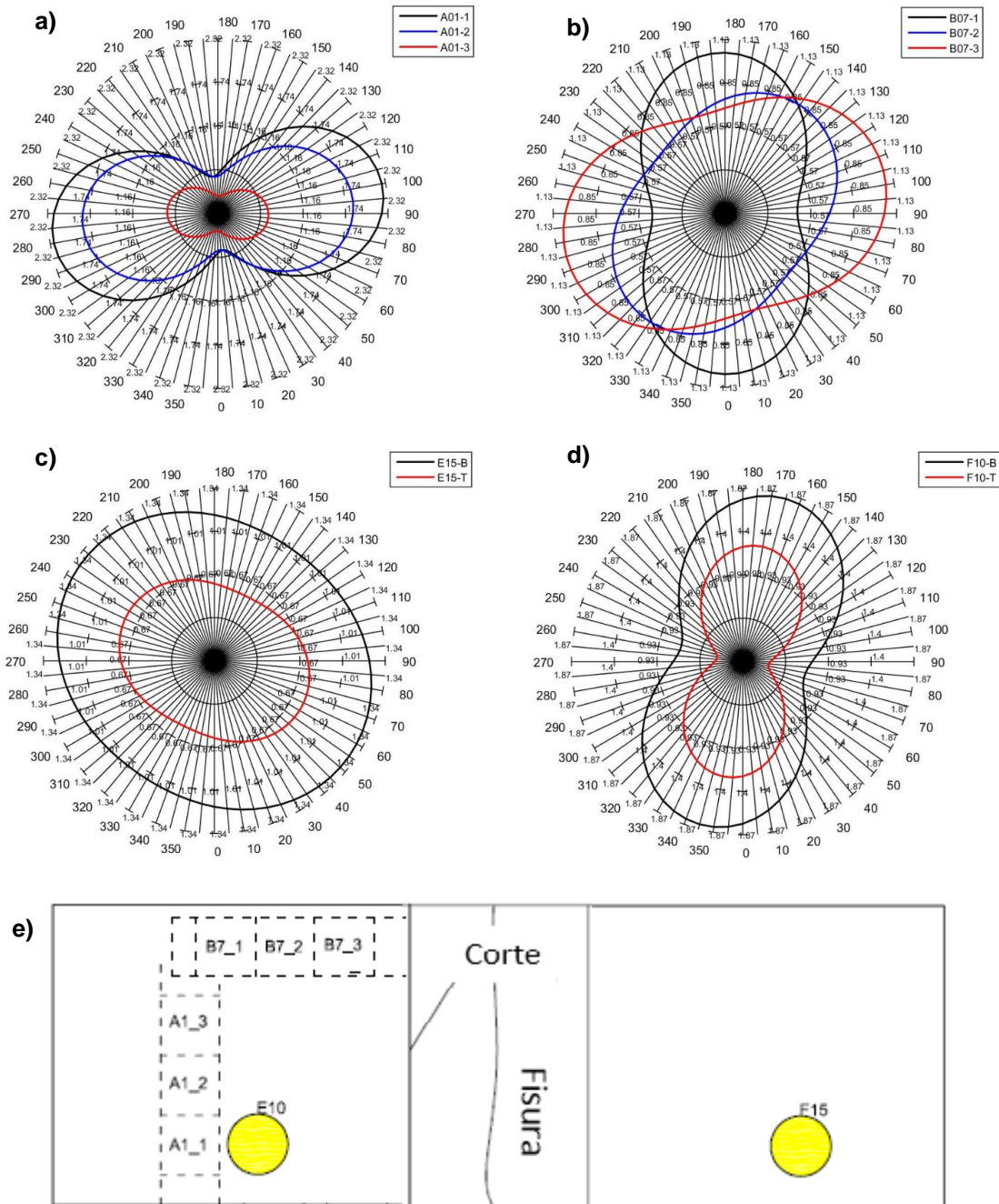


Figura 4.4. Gráficas radiales de inductancia de los núcleos a) A1, b) B7, c) E15, y d) F10; y e) ubicación de testigos mencionados.

Los testigos del núcleo B7 extraído en el Z (Figura 4.4.b), presentan formas similares por lo que puede inducirse que tienen cantidades similares de fibras, pero vemos como la orientación preferente en los testigos cambia a medida que se acerca al exterior del elemento. Este cambio de orientación puede ser resultado del efecto pared que tiende a orientar las fibras en el plano de la pared, y/o por la forma en que fue hormigonado el elemento.

Otro aspecto importante que se puede analizar con estas gráficas es, que tan orientadas están las fibras con respecto a un plano. Mientras más ovalada se la gráfica indica la preferencia de orientación en un plano, y mientras más circular indica que es un material más isotrópico. Al ver las gráficas de los núcleos E15 y F10 (Figura 4.4.c y Figura 4.4.d respectivamente) extraídos en el eje Z, se aprecia como las fibras de los testigos del núcleo F10 tienen una orientación preferente a un plano más que a otros. Mientras que los testigos del núcleo E15 aunque tienen una ligera orientación hacia a un plano, son más homogéneos por presentar una gráfica más redonda.

De las gráficas de los núcleos extraídos en el eje Z, se ve una clara preferencia a que los testigos de la parte inferior tengan un área mayor que los ubicados en la parte superior. Indicando una mayor cantidad de fibras en la parte inferior de las vigas. De hecho, de los 16 núcleos extraídos en el eje Z, 14 tiene más fibras en el testigo inferior que en superior. El promedio de las diferencias porcentuales de las fibras entre el testigo inferior y superior, resulta ser de casi 25% mayor en los testigos inferiores. Esto afecta claramente de manera positiva los resultados de las vigas al ensayo a flexión, donde por configuración del ensayo las fisuras aparecen en la parte inferior, donde se ha encontrado la mayor cantidad de fibras. Esta puede ser la razón por la que la curva promedio en el ensayo a flexión de las vigas A y B, son ligeramente mayores a la curva promedio de las vigas E y F, ya que estas últimas se ensayaron giradas 180° del eje Y.

4.3 ENSAYO BARCELONA

4.3.1 Introducción

Como se ha descrito en capítulos anteriores, el ensayo Barcelona es una prueba de tracción indirecta basado en una configuración del ensayo de doble punzonamiento. El control de dicho ensayo se realiza por posición, registrándose de forma continua la carga aplicada sobre la probeta, el recorrido del plato de carga o desplazamiento axial (δ) y el *total circumferential opening displacement* (TCOD) (UNE 83515, 2010). Este tiene la ventaja con respecto a otros ensayos de que provee una alta superficie específica de rotura, permitiendo obtener valores representativos de la resistencia y de la tenacidad del material, con un coeficiente de variación de los resultados inferior al 13%, valor que es considerablemente menor a los alcanzados con otras metodologías experimentales (Carmona et al., 2009).

Otra ventaja que presenta este ensayo es que admite el uso de muestras más pequeñas, a diferencia de la mayoría de los ensayos de caracterización que necesitan vigas prismáticas de mayor tamaño y volumen. Lo cual hace el ensayo Barcelona ideal

para aplicarlo en testigos, donde muchas veces estos se encuentran limitados por las dimensiones de la estructura original.

Aprovechando esta ventaja del ensayo Barcelona se han extraídos un gran número de muestras, un total de 56 testigos cilíndricos de 100mm de altura, con un diámetro de 100mm (dimensiones mínimas requeridas para testigos por la norma UNE 83515). Además de haber sido extraídos en diferentes ejes, como pudo verse en capítulos anteriores, han sido extraídos a diferentes alturas. Lo cual brinda la oportunidad de analizar la carga de fisuración y la resistencia residual, teniendo en cuenta el eje y la altura en que ha sido extraído el testigo.

Debido a que el interés principal del análisis radica en el estudio de la resistencia residual, se realizara un ajuste en los gráficos obtenidos tras el ensayo. Con ello se tomará como inicio de desplazamiento del pistón el punto de carga máxima, situación en la que se produce la rotura e inicia el comportamiento postfisuración de la probeta. En la Figura 4.5 se muestra el ajuste de la curva a modo explicativo.

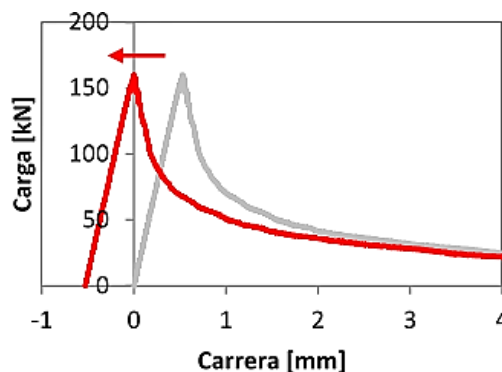


Figura 4.5. Desplazamiento de la curva del ensayo Barcelona al nuevo origen.

Para poder comparar la tenacidad de todos los testigos entre sí, los resultados del ensayo se han llevado hasta un desplazamiento de pistón (δ) de 4,0 mm después de la carga de rotura. Se ha elegido este punto ya que es el máximo necesario para la elaboración de la ecuación constitutiva, y luego de este los resultados suelen tener un comportamiento más lineal, por lo que no se registra mucha diferencia en los resultados. Los testigos de los que no se tenga registro de la carga hasta este punto, se calculara con una regresión lineal tomando los últimos puntos de la curva.

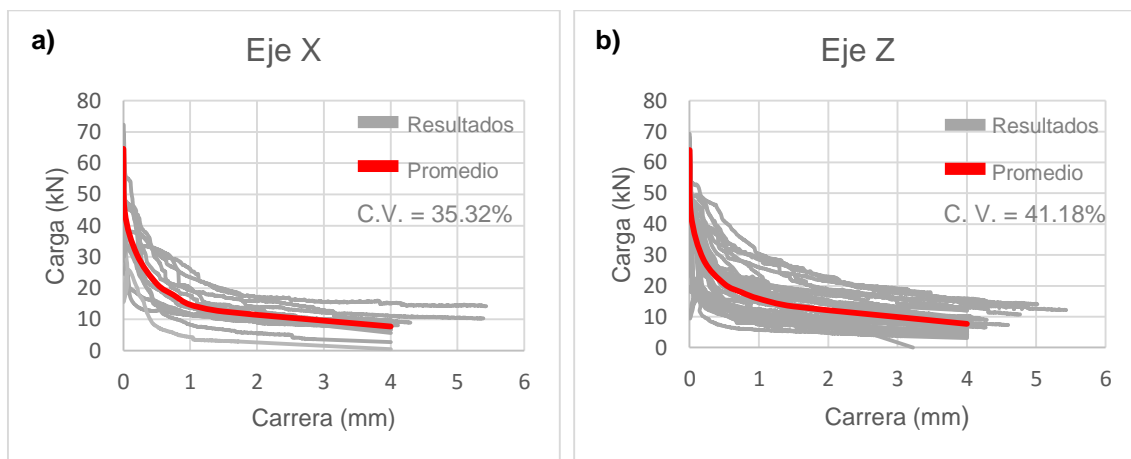
Con el objetivo de caracterizar mejor el material, en este apartado no solo se presenta los resultados del ensayo Barcelona con relación al eje y altura de extracción, sino que se analizan diferentes variables que pueden alterar dichos resultados. Se estudiara la cantidad de fibras, tanto en todo el testigo como solo las que cruzan las fisuras, con relación a la tenacidad conseguida. Se estudiara la forma de rotura de las

testigos con el fin de encontrar alguna relación con los demás resultados. Luego del análisis minucioso de los datos, se elegirá los resultados correctos para la formulación de la ecuación constitutiva del ensayo Barcelona, donde más adelante se compara con las ecuaciones constitutivas obtenidas del ensayo a flexotracción y el calculado en las vigas a escala real.

4.3.2 Influencia en el eje de extracción del testigo

Como pudo analizarse de los resultados del ensayo inductivo y el conteo manual de fibras, las fibras no solo tienen una orientación preferente en el eje Y de las vigas, sino que también existe cierta variación en la cantidad de fibras entre los testigos. Tanto la orientación como la cantidad de fibras, son factores determinantes que afectan los resultados del ensayo Barcelona, y por consiguiente la ecuación constitutiva. Por lo que la ubicación y orientación del testigo en las vigas, puede variar significativamente su resistencia.

Esto se comprueba al analizar los resultados del ensayo Barcelona al separarlos por ejes de extracción en la viga, estos se presentan en la Figura 4.6. Las gráficas a), b) y c) representan los resultados de los testigos en los ejes X, Z, y Y respectivamente. El coeficiente de variación mostrado en estas gráficas, es calculado mediante la tenacidad obtenida de cada testigo (área bajo la curva). Todos los resultados dan a demostrar un comportamiento *softening* de las fibras, es decir, la resistencia residual proporcionada por las fibras no superan la resistencia a tracción del hormigón. Este se representa como el punto más alto en las gráficas, el cual ha sido un valor cercano a los 65 kN en todos los resultados. La similitud en el valor pico de todas las curvas, puede ser indicio de una buena homogeneidad de la matriz de hormigón, destacando que no necesariamente de las fibras.



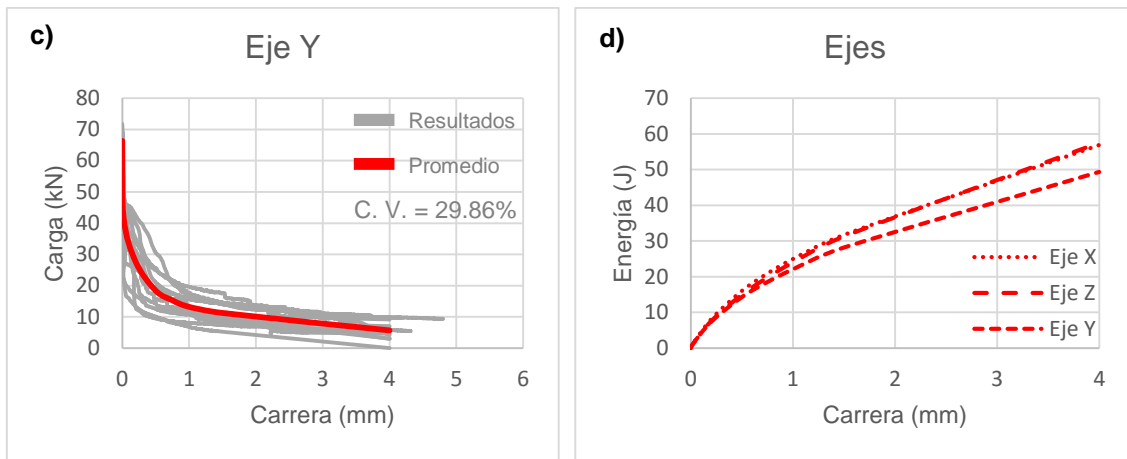


Figura 4.6. Resultados de ensayo Barcelona por ejes, a) Eje X, b) Eje Z, c) Eje Y, d) Tenacidad por ejes.

La Figura 4.6.d muestra la tenacidad promedio por ejes, se han obtenido valores parecidos en el eje X y eje Z, no así en el eje Y. La diferencia porcentual entre el eje Y y los demás es aproximadamente un 14%. Teniendo en cuenta que la orientación de las fibras es preferentemente en el eje Y, era de esperarse que los testigos extraídos en este eje proporcionen menos resistencia, ya que menos fibras cruzan el plano perpendicular al de la probeta. En la Figura 4.7 se presenta un caso hipotético en el que se explica este fenómeno, las fibras orientadas en el eje perpendicular al plano de falla que produce el ensayo, cosen más eficiente las fisuras. En cambio, si las fibras se encuentran orientas paralelamente al plano de falla, estas no aportan resistencia significativa al no cruzar la fisura.

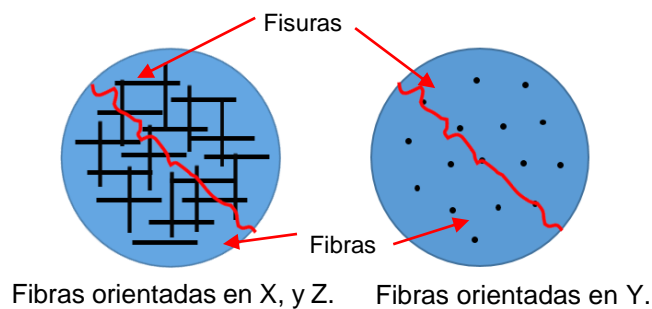


Figura 4.7. Fibras que cruzan la fisura orientadas en los tres ejes.

Al calcular la tenacidad de los testigos por eje (área bajo la curva Carga-Carrera), se obtiene un coeficiente de variación de hasta 41% en el peor de los casos (Eje Z, Figura 4.6.b). Este indica una gran dispersión en los resultados, dando a demostrar que existen otros factores que alteran los resultados aparte del eje de extracción. Como pudo de igual forma en los resultados de cantidad de fibras existe una gran dispersión en los datos, indicando cierta segregación del material. A continuación se presentan los

resultados del ensayo Barcelona categorizados no solo por ejes, sino también por altura en la viga.

4.3.3 Influencia en la altura de extracción del testigo

Luego de estudiar la cantidad de fibras en los testigos, pudo notarse que en la mayoría de los casos los testigos inferiores, contienen una cantidad mayor de fibras que los testigos superiores. La cantidad de fibras es un aspecto importante que afecta la resistencia del material, por lo que se procedió a categorizar los resultados del ensayo Barcelona también por altura del testigo en la viga.

En la Figura 4.8 se presentan los resultados del ensayo Barcelona clasificados por ejes, y altura de extracción. Las gráficas a), b), y c) representan los resultados en los ejes X, Z, y Y respectivamente. En todos los casos la dispersión de las curvas ha disminuido considerablemente, en comparación con la curva promedio.

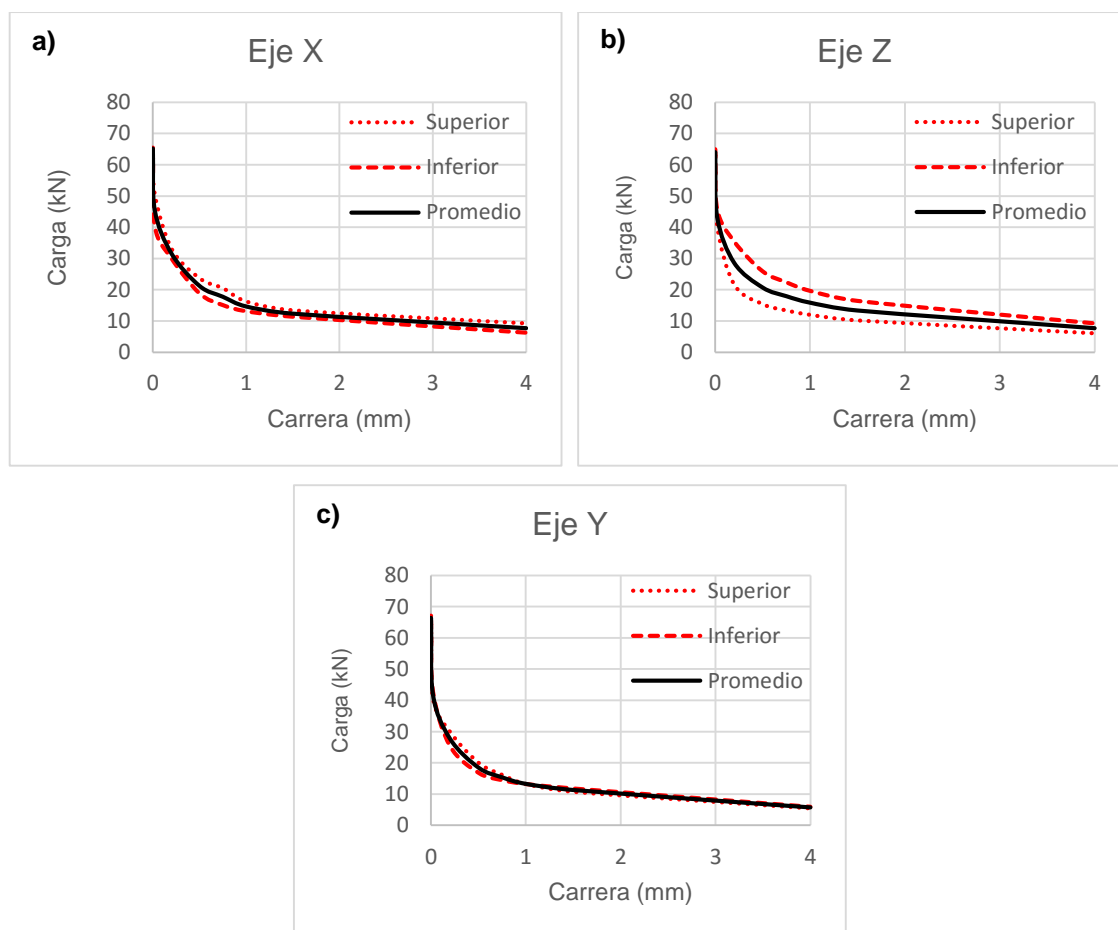


Figura 4.8. Resultados de ensayo Barcelona por ejes y altura de extracción, a) Eje X, b) Eje Z, c) Eje Y.

Aunque la cantidad de fibras suele ser mayor en los especímenes inferiores, su resistencia no ha sido significativamente más grande que la obtenida en los testigos

superiores. Las curvas superior e inferior de los ejes X y Z han resultado similares, no puede decirse lo mismo del eje Y. En este último, la diferencia porcentual de tenacidades y de cantidad de fibras entre las curvas es de un 36% y 25% respectivamente. Puede apreciarse también, de igual forma que en las gráficas divididas solo por ejes (Figura 4.6), que los resultados del eje Y son menores que en los demás ejes sin importar la altura de extracción del testigo. La orientación preferente de las fibras en el eje Y altera notablemente la resistencia de los testigos extraídos en este eje.

4.3.4 Influencia en la cantidad de fibras

La tenacidad de los testigos está relacionada con el número de fibras que cosen la fisura. Este número de fibras en la fisura está, a su vez, relacionado con la cuantía de fibras incorporada al hormigón. Por ello, resulta de interés conocer la influencia de ésta cuantía y saber cuánto aumenta la resistencia con la cantidad de fibras que se incorporan en el hormigón. Para ello, se analizan la cantidad de fibras obtenidas del ensayo inductivo y la tenacidad del ensayo Barcelona.

La Figura 4.9 muestra los resultados obtenidos para las diferentes cantidades de fibra obtenida de los testigos. Se muestran los valores de energía según el contenido de fibra.

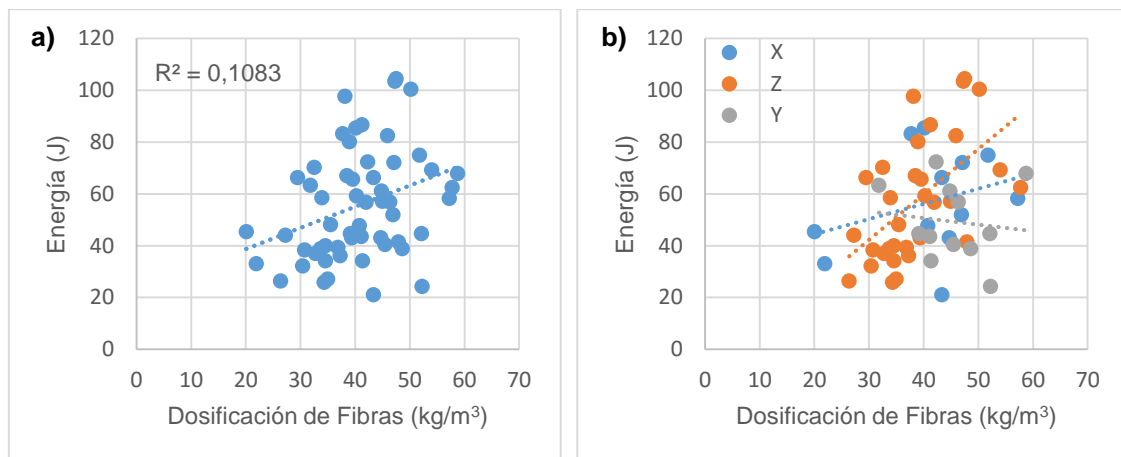


Figura 4.9. a) Cantidad de fibras y energía asociada de todos los testigos, y b) con los resultados divididos por eje de extracción.

El gráfico a) muestra como aumenta la energía necesaria para provocar la rotura de la probeta según aumenta la dosificación de fibras, nótese que existe una alta dispersión en los datos. Aun teniendo todos los testigos se planearon con la misma dosificación, puede observarse que no tienen precisamente la misma cantidad de fibras, y no tienen la misma resistencia. La resistencia no solo depende de la cuantía de fibras, sino también de la distribución y orientación de estas. Debido a esto, un testigo puede

tener la misma cantidad de fibras y no alcanzar la misma resistencia. Nótese también que la dispersión de los testigos en el eje Y es menor (Figura 4.9.b), lo cual resulta conveniente en caso de que tenga que elegirse algún eje como preferencial para la extracción de un testigo.

Estos incrementos en resistencia y energía están directamente relacionados con la cuantía de fibras, aunque esta no sea la única razón de estos. Un mayor contenido provoca también que un mayor número de fibras cosan la fisura que se genera durante el ensayo. Por tanto, el aumento de la cuantía de fibras permite alcanzar mayores resistencias y da la posibilidad de resistir mayores sollicitaciones.

4.3.5 Influencia en la cantidad de fibras que cruzan la fisura

Según se estudió en la literatura (Blanco Álvarez, 2013; Galeote, 2014; Pujadas, 2013), la cuantía de fibras está directamente relacionada con la resistencia residual. Mayor la cantidad de fibras, mayor resistencia residual se obtiene. Esto se debe al aumento de fibras que cosen las fisuras. Con el objetivo de estudiar en más detalle este aspecto, se abrieron mínimo dos testigos de cada eje finalizado el ensayo Barcelona. Una vez abiertas las probetas se contaron las fibras vistas, para relacionarlas con la resistencia del testigo. En la Figura 4.10 se presenta la cantidad de fibras contadas que cruzaban las fisuras vs la tenacidad obtenida por el ensayo Barcelona.

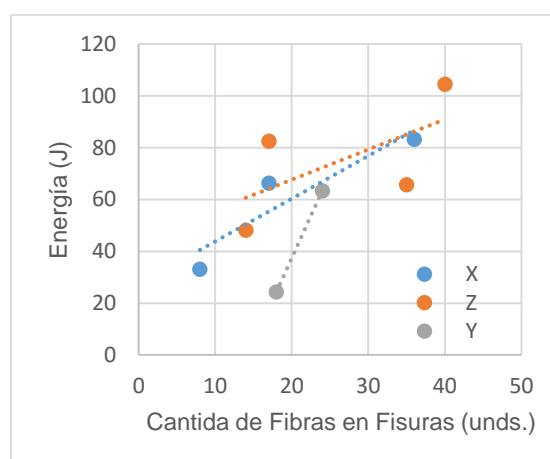


Figura 4.10. Fibras que cosen la fisura vs energía.

Puede notarse que en todos los casos el aumento en la cantidad de fibras que cruzan la fisura, resulta en un aumento de la resistencia residual. Claro está que este no es el único parámetro que influye en el aumento de resistencia residual, aun así es un aspecto primordial para lograr este objetivo.

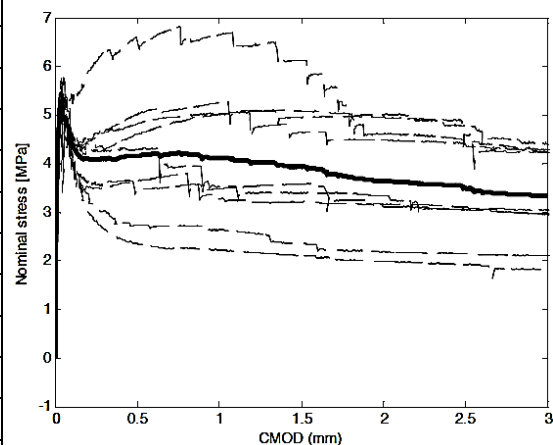
4.4 ENSAYO A FLEXOTRACCIÓN

El ensayo a flexotracción *3-point bending* (EN 14651, 2005) es ampliamente conocido y apreciado en los laboratorios por su simplicidad. Como se ha descrito en la campaña experimental, este consiste en vigas prismáticas sometidas a flexión por medio de una carga centrada.

Para la realización del ensayo a flexotracción 3pb se han utilizado nueve probetas de 150x150x600 mm. Los resultados de este ensayo vienen dados por curvas Tensión-CMOD, en la Tabla 4.2 se muestran los resultados obtenidos. F_{cftl} corresponde al punto en que aparece la fisura, f_{r1} , f_{r2} , f_{r3} , y f_{r4} corresponde a los esfuerzos obtenidos al registrar un CMOD de 0,5, 1,5, 2,5 y 3,0 respectivamente.

Tabla 4.2. Resultados ensayo de flexotracción.

Muestra	F_{cftl} (MPa)	f_{r1} (MPa)	f_{r2} (MPa)	f_{r3} (MPa)	f_{r4} (MPa)
1A	5,770	4,276	3,401	3,050	2,696
2A	5,614	3,468	3,583	3,096	2,933
3A	5,428	6,546	6,118	4,768	4,270
4A	4,644	3,649	3,207	3,054	2,823
5A	4,952	4,808	4,950	4,583	3,801
6A	5,699	5,010	5,081	4,470	4,133
7A	5,289	2,351	2,104	1,912	1,701
7B	5,643	4,594	4,644	4,414	4,061
7C	5,064	2,736	2,350	2,144	2,044
PROM.	5,345	4,160	3,938	3,499	3,162
D.E.	0,365	1,205	1,266	1,026	0,892
C.V.%	6,837	28,978	32,142	29,335	28,196



Como se comprueba en la literatura, el ensayo tiene una dispersión relativamente elevada, que es de aproximadamente el 20-30% (Mármol, 2010), el coeficiente de variación es mayor de 28% en todos los puntos. Lo cual presenta un problema para poder determinar los valores característicos ya que en consecuencia no tendrán una fiabilidad elevada. El hecho de utilizar una viga con entalla hace que la superficie efectiva de rotura se reduzca en comparación a la viga sin entalla, se considera este como uno de los factores que causa la elevada dispersión de resultados.

4.5 ENSAYO A FLEXIÓN A ESCALA REAL

Con el fin de comparar cual ecuación constitutiva se acerca más al comportamiento de un elemento estructural real, se han ensayado a flexión 4 vigas a

gran escala. Estas tienen dimensiones de 500x250x1500 mm, y es de donde se han extraído los testigos. Este ensayo a escala real básicamente ha consistido, en especímenes de haz prismáticas (las vigas) sujetas a un momento flector. Por la aplicación de carga a través de rodillos superiores bajo el control de la deflexión o de la abertura de fisura (COD, por sus siglas en ingles), para obtener la respuesta de la viga carga/deflexión y carga/COD. El primer pico y máximo, las cargas residuales sostenidas se registran, y las correspondientes resistencias a flexión son calculadas.

En la Figura 4.11 se presentan los resultados obtenidos del ensayo, la gráfica a) muestra todos los resultados y la curva promedio, la gráfica b) muestra la línea promedio de las vigas A y B, y la línea promedio de las vigas E y F. Cabe destacar que los resultados de la viga B han resultado ser notablemente mayores que los demás (Figura 4.11.a). Según los resultados de cantidad de fibras por testigo (Tabla 4.1), los testigos de la viga B suelen contener un mayor número de fibras con un coeficiente de variación menor, lo que puede indicar que esta viga contenga cierta cantidad mayor de fibras con una mayor homogeneidad en el material. Debido a esto, es de esperarse que la viga B arroje resultados mayores que las demás. De igual forma se pueden estudiar los resultados de la viga A, esta ha resultado ser la de menor resistencia, y coincide con la viga con mayor dispersión en la cantidad de fibras entre sus testigos.

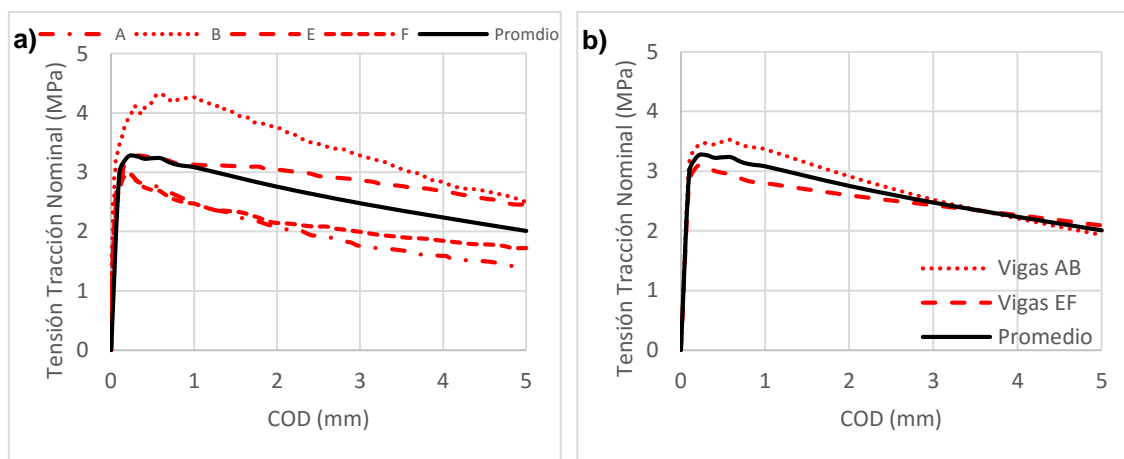


Figura 4.11. Resultados de ensayo a escala real, a) todos los resultados, b) ensayo con vigas sin girar (A, y B) y giradas 180° (E, y F).

Como se ha explicado en la campaña experimental las vigas se han ensayado dos en su posición original y dos giradas 180° de su eje. Esto con el objetivo de analizar si esto representa alguna alteración en los resultados, en teoría si el material es homogéneo no debería afectar nada. En la gráfica de la Figura 4.11.b se han obtenido las curvas promedio de las vigas ensayadas en su posición original (vigas A y B) y las ensayadas giradas 180° (vigas E y F), el promedio de las vigas ensayadas en su

posición original ha resultado ser mayor que el promedio de las vigas giradas, e incluso mayor que la curva que representa el promedio de todos los resultados.

Esto pone nuevamente en evidencia la relación directamente proporcional entre la cantidad de fibras y la resistencia residual, ya que esto se justifica al saber que existe una mayor distribución de fibras en la parte inferior de las vigas, como pudo estudiarse mediante el ensayo inductivo y los ensayos Barcelona. Al ensayar las vigas giradas 180° sobre su eje, la fisura se genera en las zonas con menos cantidad de fibras, esto se explica más claramente en el esquema de la Figura 4.12.

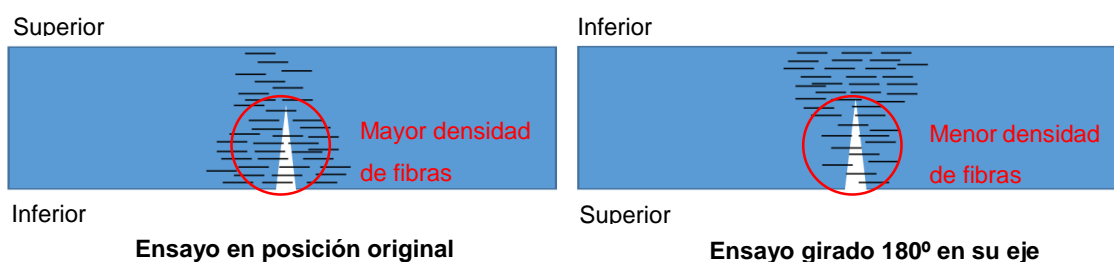


Figura 4.12. Esquema de distribución de fibras en las vigas.

4.6 ECUACIONES CONSTITUTIVAS

4.6.1 Introducción

En los apartados anteriores se han analizado todos los resultados obtenidos mediante los ensayos de caracterización y el ensayo a escala real, estos con el objetivo de entender mejor las ecuaciones constitutivas que se derivan de los mismos. La identificación del modelo constitutivo a tracción representa uno de los pasos fundamentales en el diseño de estructuras de HRFA. Durante los últimos 15 años se han desarrollado numerosas recomendaciones técnicas con el fin de facilitar el diseño de este tipo de estructuras y extender su uso. La variedad de ecuaciones constitutivas existentes hace patente la falta de un único modelo aceptado de forma general.

Esto ha motivado a comparar las ecuaciones constitutivas de los ensayos con la ecuación obtenida del ensayo a escala real, con el fin de observar cual se asemeja más al comportamiento estructural de la viga. Primero, se presentan las ecuaciones constitutivas derivadas de cada ensayo, y se analizan algunos de los factores que influyen en estos. Nótese que todos los modelos constitutivos no han sido reducidos por ningún tipo de factor de seguridad, con el objetivo de compararlos en igual nivel. Más adelante, se compararán con la ecuación obtenida en la viga a escala real.

4.6.2 Ecuación constitutiva de ensayo Barcelona.

El ensayo Barcelona es presentado como una alternativa para caracterizar las propiedades a tensión de los HRF, aun así no existe un modelo constitutivo normativo que se derive de este. En vista de esto, Blanco et al. (2014) han propuesto un modelo constitutivo, el cual ha sido validado mediante la simulación de los resultados de un programa experimental, que involucro diferentes tipos de fibras y el contenido de fibra mediante un software de elementos finitos. La formulación de este modelo se explica en detalle en Capítulo 2 (apartado 2.5.3).

Este modelo constitutivo involucra algunos aspectos del material, que no son necesarios en los demás modelos, como son el ángulo de falla (β) y el coeficiente de fricción cinemática (μ_k) del material. El ángulo de falla del material depende del efecto trabazón entre los agregados y las fibras cruzando la superficie de contacto, según la literatura este suele ser igual a 25° , aunque se recomienda usar valores de medición directos de la probeta ensayada. Este puede ser fácilmente medido con extraer la cuña de penetración luego de realizado el ensayo, como pudo verse en la campaña experimental (Capítulo 3) este ha resultado dar valores cercanos a los recomendados. Por lo que se ha utilizado un valor β de 25° la formulación de las ecuaciones.

Con respecto al coeficiente de fricción, los valores encontrados en la literatura usualmente cubren el coeficiente estático (μ_s). Pero limitada información está disponible para el coeficiente cinemático (μ_k). Es sabido que el μ_k es ligeramente menor que el μ_s , por lo que se han utilizado valores de coeficiente estático propuestos por el Model Code (Model Code, 2010), con una ligera reducción. Se ha utilizado un coeficiente de fricción cinemático igual a 0,7, el cual se considera una buena estimación inicial.

En la Figura 4.13 se presentan los resultados del ensayo elegidos, y el modelo constitutivo propuesto para el ensayo Barcelona. Este es un modelo compuesto en cuatro tramos. Para su obtención se han utilizados los valores promedio de los testigos extraídos del eje X y eje Z, ya que los testigos del eje Y no representan el plano de falla de las vigas, y su resistencia se ha visto afectada por la orientación preferente de las fibras en este eje. Debido a esto se puede concluir, que no se recomienda la extracción de testigos en el eje de la viga.

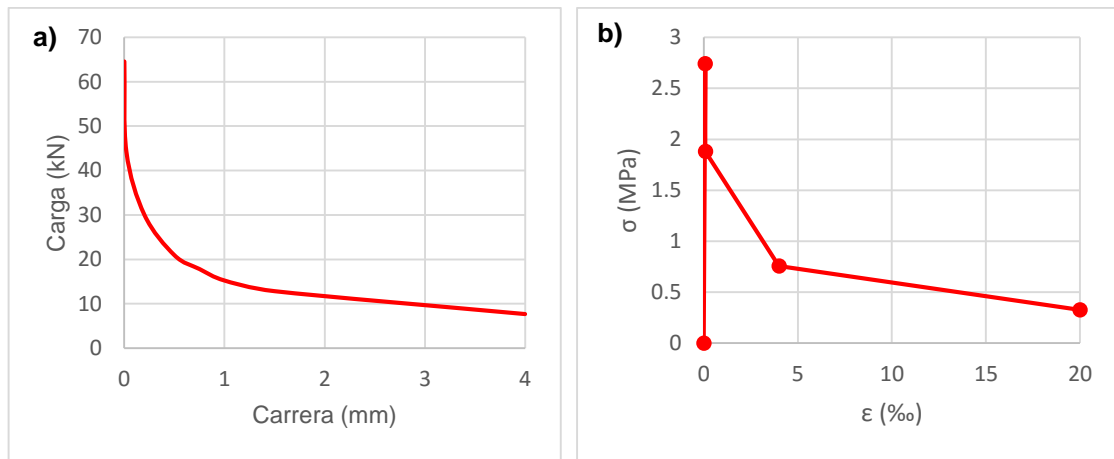


Figura 4.13. Ecuación constitutiva ensayo Barcelona.

Otro punto importante a considerar es la ausencia de una fórmula única para calcular el módulo elástico con fibras. Una opción es utilizar las fórmulas de hormigón convencional, como los provistos en normas como la EHE (EHE, 2008) o ACI (ACI, 2008). En esta investigación se ha optado por usar la formulación recomendada por la RILEM (RILEM TC162-TDF, 2003), la cual es específicamente para HRF. Se ha utilizado un módulo elástico igual a 36261 MPa, este se ha calculado en base a la resistencia a compresión obtenida de probetas cubicas ensayadas a los 28 días.

4.6.3 Ecuación constitutiva de ensayo a flexotracción.

Varios modelos constitutivos concuerdan con el mismo tipo de ensayo y probeta. El ensayo a flexotracción 3pb (EN 14651, 2005) es usado para caracterizar la resistencia a tracción de las fibras, y obtener la ecuación constitutiva por diferentes normas europeas. Algunas de estas son: la normativa española de hormigón EHE (EHE, 2008), la RILEM (RILEM TC162-TDF, 2003) y el Código Modelo (Model Code, 2010). En la Figura 4.14 se presentan los modelos constitutivos por las normas antes mencionadas, utilizando el promedio de los resultados de todas las probetas, la formulación de estos se detalla en el Estado del Conocimiento (Capítulo 2, Tabla 2.3).

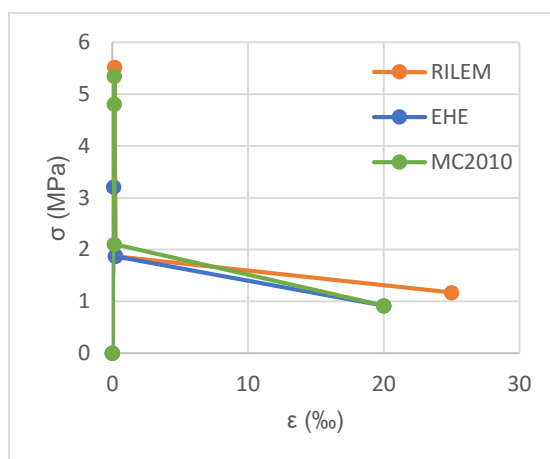


Figura 4.14. Ecuación constitutiva ensayo a flexotracción.

La normativa RILEM y EHE proponen un modelo constitutivo trilineal, mientras el Código Modelo propone uno cuatrilíneo. Los esfuerzos pico de los modelos de la RILEM y el Código Modelo se encuentran por encima del esfuerzo pico de la EHE. A pesar de esto, no se observa mucha diferencia entre ellos.

Cabe destacar, que la RILEM es de las pocas normas que propone una fórmula específica de HRF para el módulo de elasticidad. La misma se ha utilizado también en el modelo constitutivo del ensayo Barcelona. Otro aspecto novedoso que difiere de algunos modelos, es la incorporación de un coeficiente de forma. Este debe multiplicarse a las tensiones asociadas al ensayo, y depende básicamente solo de la altura de la muestra.

4.6.4 Ensayo a escala real

Para la obtención de la ecuación constitutiva proveniente del ensayo a escala real, se ha optado por un análisis indirecto. Esta estrategia parte de los resultados experimentales de la sección y/o estructura cuyo comportamiento se quiere simular numéricamente, y se ajustan los valores de una ecuación constitutiva, cuya forma puede haberse predefinido. Concretamente, el planteamiento consiste en obtener los parámetros que definen la ecuación constitutiva del HRF traccionado, variándolos de forma que la respuesta de la estructura obtenida numéricamente se ajuste a la obtenida experimentalmente (Laranjeira, 2010). Como valores experimentales se ha utilizado la respuesta promedio de las cuatro vigas ensayadas (vigas A, B, E, y F).

En este proceso se pueden aplicar métodos de cálculo simplificados u otros más sofisticados, como el método de los elementos finitos. Se ha optado por herramientas de menos complejas como macros y hojas de cálculo, las cuales son más sencillas de programar. Básicamente, esta ha consistido en dividir la sección transversal de la viga

en un número finito de capas. Sin embargo, hay muchas capas tanto en la zona de tracción como en la de compresión del hormigón, y la variación de las tensiones en cada una de estas zonas no se conoce.

La suposición de que las mismas relaciones de tensión-deformación se aplican a todas las capas permite la reducción del número de incógnitas a uno, para cada una de las zonas a tracción y compresión. Las ecuaciones de equilibrio se resuelven para las tensiones en las fibras extremas. Dado que las fibras extremas tienen las mayores deformaciones, todas las demás deformaciones caen dentro de una porción del diagrama tensión-deformación que ya se ha determinado. La carga aplicada se divide en incrementos y el cálculo se realiza de forma incremental. Durante el primer incremento de carga, tensiones de tracción y compresión correspondientes a las deformaciones en las fibras extremas se calculan. Estas tensiones se utilizan luego en las ecuaciones de equilibrio para el segundo incremento de carga, cuando se determinan las nuevas tensiones correspondientes a las nuevas deformaciones. De esta manera, las curvas tensión-deformación para el hormigón a tracción y a compresión se obtienen progresivamente de todos los incrementos anteriores y se usan en el siguiente incremento de carga.

Este procedimiento se esquematiza en la Figura 4.15, y puede verse con más detalle en la investigación publicada de Kaklauskas et al. (2001).

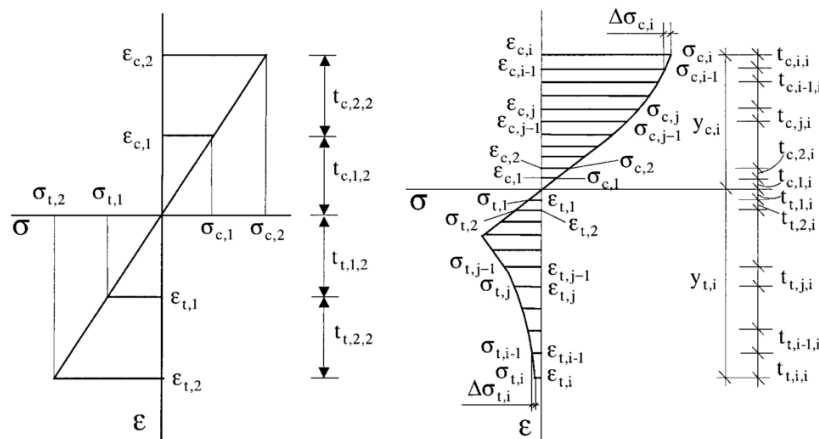


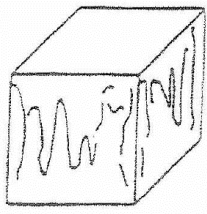
Figura 4.15. Esquema tensión-deformación del modelo usado para la obtención de la ecuación constitutiva (Kaklauskas et al., 2001).

Como primera iteración se ha optado por un modelo trilineal parecido al de la RILEM (RILEM TC162-TDF, 2003) para la zona en tracción, ya que al ser un proceso iterativo mientras menos puntos se necesiten iterar más rápido se llega a la respuesta. Para la zona en compresión se ha utilizado los resultados del ensayo a compresión simple de las probetas cúbicas, rotas a los 28 días de su fabricación. En la Tabla 4.3 puede verse los resultados del ensayo a compresión simple, y un gráfico representativo

del modo de fallo de las probetas. Todas las probetas rompieron de la misma forma, probablemente por la incorporación de las fibras que evita el desprendimiento de material. Otro dato importante es que se ha utilizado la formulación del módulo elástico sugerido por la RILEM para los HRFA.

Tabla 4.3. Resultados de ensayo a compresión simple.

Probeta	Resistencia a Compresión (MPa)	Probeta	Resistencia a Compresión (MPa)
1	59,46	5	55,12
2	55,87	6	56,49
3	53,42	7	51,38
4	57,56	Promedio	55,61



Un factor importante que afecta los cálculos directamente es la longitud característica (l_{cs}). Existen diferentes normas e investigadores que sugieren diversos valores, alguno de estos se presentan en el Estado del Conocimiento (Capítulo 2, Apartado 2.5.2). Se han optado por usar dos l_{cs} diferentes para comparación, uno igual al valor de la altura de la viga entre dos ($h/2$) (RILEM TC162-TDF, 2003), y otro igual a la altura de la viga (h) (Model Code, 2010). En las Figura 4.16 y Figura 4.17, se presenta la última iteración del modelo constitutivo y la respuesta estructural que se deriva del mismo comparándolo con la respuesta experimental, para el caso de $l_{cs}=h/2$ y $l_{cs}=h$ respectivamente.

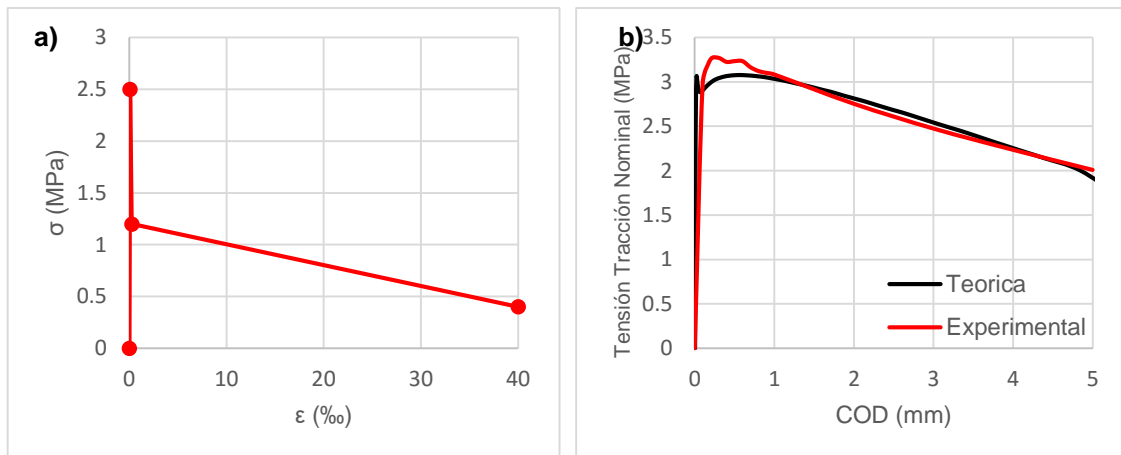


Figura 4.16. Ecuación constitutiva por medio de iteración de ensayo a escala real con $l_{cs}=h/2$.

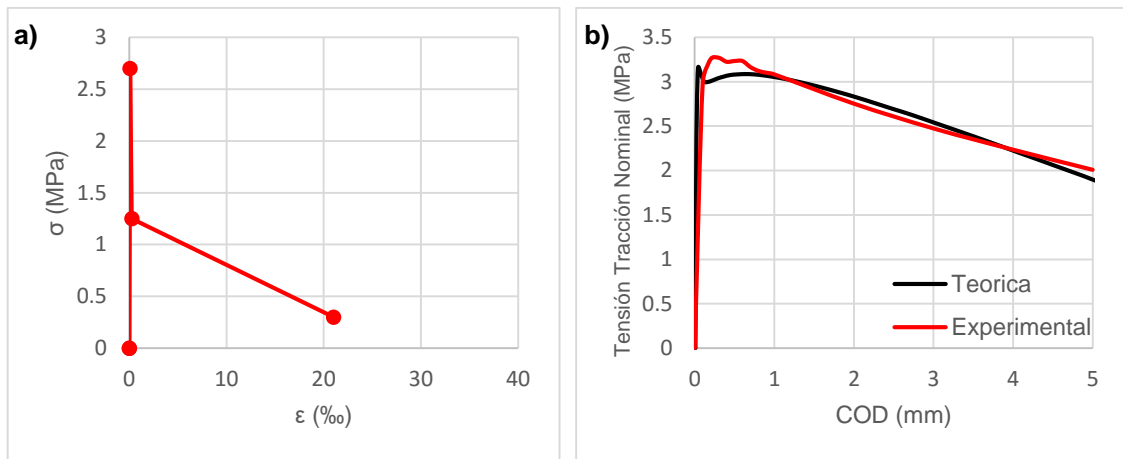


Figura 4.17. Ecuación constitutiva por medio de iteración de ensayo a escala real con $l_{cs}=h$.

En ambos modelos constitutivos se observa una buena precisión en comparación con la respuesta experimental, y mucha semejanza entre si aun utilizando l_{cs} diferentes. Básicamente, la única diferencia ha sido la deformación ultima que en el caso de $l_{cs}=h/2$ ha sido de 40‰ y con $l_{cs}=h$ de 21‰, lo cual produce que en este último, el tramo final del modelo tenga una pendiente mayor en comparación con el otro modelo. La diferencia entre las tensiones y las demás deformaciones ha sido mínima. Por lo que puede concluirse que la longitud característica afecta más la tensión y deformación ultimas.

4.6.5 Comparación de ecuaciones constitutivas

Todas las ecuaciones constitutivas obtenidas, se presentan juntas en la Figura 4.18. Se observa claramente que las ecuaciones constitutivas provenientes del ensayo a flexotracción sobrestiman la resistencia a tracción residual del HRFA, todos sus puntos se encuentran por encima de los modelos constitutivos de las vigas. Nótese también que altamente sobreestima la tensión pico en todos los casos, menos el modelo de la EHE (EHE, 2008).

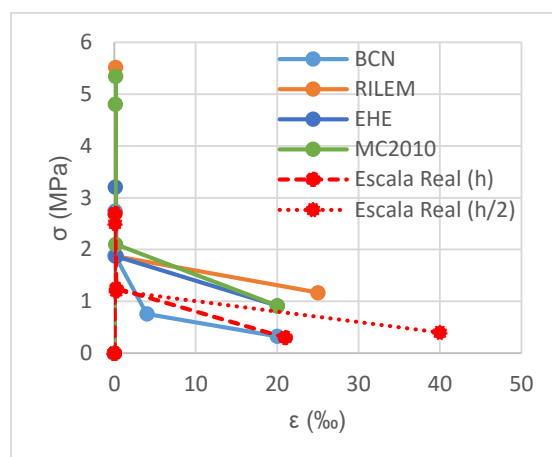


Figura 4.18. Comparación de ecuaciones constitutivas.

La ecuación derivada del ensayo Barcelona ha sido la más similar a las ecuaciones constitutivas obtenidas del ensayo a flexión de las vigas. Muestra resultados ligeramente menores a los modelos de las vigas, lo cual se encuentra dentro del marco de la seguridad. La tensión pico para el caso de las vigas con $l_{cs}=h$, ha sido prácticamente la misma que el modelo constitutivo del ensayo Barcelona. De igual forma, la tensión y la deformación última han sido parecidas. Por lo que se considera el ensayo Barcelona un método más acertado para la caracterización de HRFA.

Es importante destacar que los resultados del ensayo Barcelona han sido obtenidos partir de testigos, a diferencia del ensayo a flexotracción que son de probetas moldeadas. Estudios muestran que en el ensayo Barcelona, la resistencia residual de las probetas moldeadas es siempre mayor que la de los testigos. Esto obedece a que una cantidad significativa de fibras resultan cortadas durante el proceso de extracción del testigo. Al perder uno de los extremos, la fibra pierde parte de su eficacia al no estar adecuadamente anclada. En las probetas modeladas todas las fibras están íntegras con sus ganchos y pueden desarrollar toda su capacidad resistente. Con respecto a los resultados entre probetas moldeadas y probetas testigo de igual diámetro, cabe señalar que las probetas testigo conducen a un valor menor respecto a las moldeadas en una relación de 0,85 (Aire et al., 2013).

La Figura 4.19 presenta la misma grafica anterior, pero con la ecuación constitutiva del ensayo Barcelona multiplicada por el factor testigo. Se aprecia que este no presenta cambio significativo en los resultados. Inclusive, asemeja aún más el modelo al obtenido de las vigas.

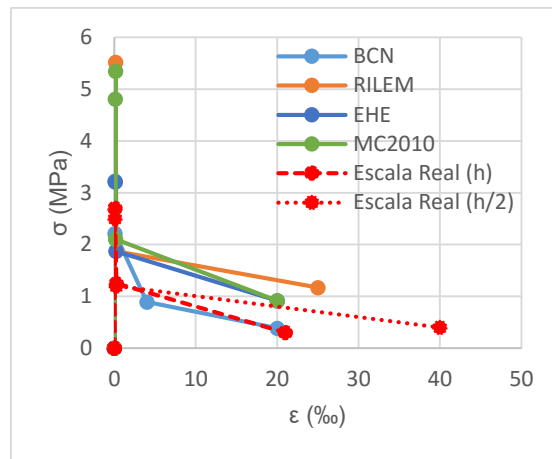


Figura 4.19. Comparación de ecuaciones constitutivas, con modelo del ensayo Barcelona con factor testigo.

5 CONCLUSIONES

5.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan las conclusiones alcanzadas en el presente trabajo después de todos los estudios realizados. Éstas se presentan divididas en dos partes: conclusiones generales y conclusiones específicas.

Las conclusiones generales están asociadas a los objetivos generales que se han planteado en la introducción del trabajo. Éstos trataban en la caracterización del HRFA, y buscar el modelo constitutivo que se asemeje más al comportamiento real de las vigas ensayadas.

En cuanto a las conclusiones específicas, éstas muestran con detalle los logros obtenidos. Mediante la suma de estos logros puntuales se ha llegado a cumplir los objetivos generales que se planteaban en este trabajo.

5.2 CONCLUSIONES GENERALES

Como conclusión general a este trabajo, puede decirse que el ensayo Barcelona en conjunto con el ensayo inductivo, caracterizan el material de manera precisa. Al

realizar el ensayo inductivo primero y luego el ensayo Barcelona, es posible obtener la cantidad, orientación, y la resistencia a tracción de las fibras con la misma muestra. Lo que incide en un ahorro de material y un mejor entendimiento del material, en comparación con los ensayos de flexotracción que utilizan muestras con más volumen de hormigón, complicando así la utilización del ensayo inductivo.

Con la utilización de ambos ensayos, pudo estudiarse la distribución de las fibras en las vigas a través de los testigos. Las cuales han mostrado una gran variedad de resultados, lo cual no era de esperarse tanta dispersión, indicando así cierta segregación del material. Esto se utiliza para justificar alguno de los resultados obtenidos de los ensayos.

Otra ventaja importante es que el ensayo Barcelona no solo utiliza muestras más pequeñas, sino también estas poseen un área de rotura mayor en la realización del ensayo que los ensayos a flexotracción. Esto se traduce en resultados en una menor dispersión como pudo observarse en los resultados de los ensayos.

Otra observación es que la resistencia a tracción de los testigos se ha visto afectada por el eje de extracción del mismo, debido a la orientación preferente de las fibras en el elemento estructural. Por lo que se aconseja que al extraer testigos, estos representen el plano de falla del elemento estructural (eje X y Eje Z en este caso), con el objetivo de tener la respuesta del testigo lo más similar a la respuesta del elemento original.

Al evaluar las ecuaciones constitutivas, se identifica que el modelo constitutivo del ensayo Barcelona (Blanco et al., 2014) se asemeja más a la respuesta estructural de las vigas. El hecho de que el ensayo Barcelona se realizó a través de testigos, y el ensayo a flexotracción a través de probetas moldeadas no cambia esta conclusión, esto se evaluó utilizando el factor testigo (Aire et al., 2013) en los resultados del ensayo Barcelona. Claramente los modelos constitutivos evaluados del ensayo a flexotracción, sobrestiman en gran manera la resistencia a tracción del material.

5.3 CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

Las conclusiones aquí presentadas responden a los objetivos específicos que se plantearon al inicio del estudio, las cuales se han estudiado a través de los ensayos y análisis anteriormente expuestos:

- La adición de fibras en el hormigón mejoran en general las características del hormigón, en especial la respuesta a tracción.

- El ensayo inductivo en conjunto con el ensayo Barcelona, se considera una buena estrategia para la caracterización de los HRFA, ya que se obtiene información de la cantidad, orientación, y resistencia con la misma muestra.
- Por medio del ensayo inductivo, se ha percatado cierto grado de segregación de las fibras en las vigas, donde estas se encuentran en mayor concentración en la parte inferior de los elementos estructurales. Alterando así la respuesta a flexión de los mismos, y la resistencia a tracción de los testigos.
- El eje de extracción del testigo afecta los resultados del ensayo Barcelona, debido a la orientación preferente de las fibras. Se aconseja que el testigo extraído represente el plano de falla de la estructura original.
- Incluso con el estudio de una sola dosificación, se observa la relación directamente proporcional entre la cantidad de fibras y la resistencia a tracción.
- Al contar las fibras que cosen la fisura, se presencia que a mayor cantidad de fibras, mayor resistencia se obtiene del testigo.
- El ensayo a flexotracción (3pb) muestra una dispersión en los resultados mayores al 28%.
- Para el ensayo a escala real, la longitud característica igual a la altura del elemento ($l_{cs}=h$) presenta un modelo constitutivo más similar a los modelos constitutivos de los ensayos de caracterización.
- De los modelos constitutivos evaluados, el que se asemeja más a la respuesta estructural de las vigas es el proveniente del ensayo Barcelona. Los provenientes del ensayo a flexotracción sobrestiman la respuesta estructural de la viga.

5.4 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Luego de profundizar en las características del HRFA y en los modelos constitutivos recomendados en diferentes normas. Se propone estudios más profundos en los siguientes aspectos:

- Realizar una campaña experimental más amplia para la validación de los resultados obtenidos, con diferentes tipos de fibras. Por otro lado, la fabricación y el ensayo de un mayor número de hormigones permitiría reproducir con mayor fiabilidad su comportamiento y aumentar el número de datos de la muestra.
- El modelo constitutivo del ensayo Barcelona requiere del coeficiente de fricción cinemático del material. Sobre este se encuentra poca información, por lo que se tiene a usar los coeficientes de fricción estáticos, lo que conlleva un ligero

error en los cálculos. Se requieren más estudios para evaluar el coeficiente de fricción cinemático del material en el ensayo Barcelona.

- Se necesitan estudios más profundos para identificar un criterio único para definir la longitud característica.
- Desarrollo de modelos capaces de predecir la distribución de las fibras en el elemento ejecutado y la respuesta mecánica, para conseguir así diseños desde el punto de vista analítico y numérico más precisos.

REFERENCIAS

Abrishambaf, A., Barros, J., Cunha, V., y Cunha, F. (2012). *Assessment of fibre orientation and distribution in steel fibre reinforced self-compacting concrete panels*. BEFIB2012.

ACI. (2008). *Aci-318S-08, Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural y Comentarios*.

AFGC-SETRA. (2002). *Ultra high performance fibre-reinforced concretes, interim recommendations*. AFGC Publication, France.

Aire, C., Molins, C., y Aguado, A. (2013). *Ensayo de doble punzonamiento para concreto reforzado con fibra: efecto del tamaño y origen de la probeta*. Concreto Y Cemento: Investigación Y Desarrollo, 5(1), 17–31.

ASTM C-1550. (2012). *Standard Test Method for Flexural Toughness of Fibre Reinforced Concrete (Using Centrally-Loaded Round Panel)*. American Society for Testing and Materials.

ASTM C1609. (2007). *Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)*. ASTM International, West Conshohocken.

- Barros, J., y Figueiras, J. (1999). *Flexural Behavior of SFRC: Testing and Modeling*. Journal of Materials in Civil Engineering, 331-339.
- Bischoff, P. (2003). *Tension stiffening and cracking of steel fiber-reinforced concrete*. Journal of Materials in Civil Engineering, 175-182.
- Blanco Álvarez, A. (2013). *Characterization and modelling of SFRC elements*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Blanco, A., Pujadas, P., Cavalaro, S., de la Fuente, A., y Aguado, A. (2014). *Constitutive model for fibre reinforced concrete based on the Barcelona test*. Cement and Concrete Composites, 53, 327–340. <http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.07.017>
- Blanco, A., Pujadas, P., De La Fuente, A., Cavalaro, S., y Aguado, A. (2013). *Application of constitutive models in European codes to RC-FRC*. Construction and Building Materials, 40, 246–259. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.096>
- Carmona, S., Aguado, A., Molins, C., y Cabrera, M. (2009). *Control de la tenacidad de los hormigones reforzados con fibras usando el ensayo de doble punzonamiento (ensayo Barcelona)*. Revista Ingeniería de Construcción, 24(2), 119–140. <http://doi.org/10.4067/S0718-50732009000200001>
- Cavalaro, S. H. P., López, R., Torrents, J. M., Aguado, A., y García, P. J. (2015). *Assessment of fibre content and 3D profile in cylindrical SFRC specimens*. Materials and Structures. <http://doi.org/10.1617/s11527-014-0521-2>
- Chen, W. (1970). *Double punch test for tensile strength of concrete*. ACI Materials Journal, 993-995.
- CNR-DT 204. (2006). *Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Strutture Fibrorinforzato*. Consiglio Nazionale delle Ricerche, Italia.
- Chermant, J. (2001). *Why automatic image analysis? An introduction to this issue*. Cement and Concrete Composites, 23 (2), 127-131.
- de Montaignac, R., Massicotte, B., Charron, J., y Nour, A. (2012). *Design of SFRC structural elements: flexural behaviour prediction*. Materials and Structures, 623-636.
- di Prisco, M., Plizzari, G., y Vandewalle, L. (2009). *Fibre reinforced concrete: new design perspectives*. Materials and Structures, 42, 1260-1281.
- Dupont, D., y Vandewalle, L. (2005). *Distribution of steel fibres in rectangular sections*. Cement and Concrete Composites, 1261-1281.

- EHE. (2008). *EHE-08 Regulation of structural concrete (In Spanish)*, 704.
- EN 14651. (2005). *Test method for metallic fibered concrete – Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual)*. European Committee for Standardization, Brussels.
- Fernandes, A. (2004). *Modelos de fenda discreta na simulação do comportamento em flexão de betão reforçado com fibras de aço*. PhD Thesis, Universidade do Minho, Guimarães.
- Ferrara, L., Faiter, M., y Toscani, S. (2012). *A magnetic method for non destructive monitoring of fiber dispersion and orientation in steel fiber reinforced cementitious composites—part 1: method calibration*. Materials and Structures, 45, 575-589.
- Galeote, E. (2014). *Correlación entre el ensayo a flexotracción y el ensayo multidireccional para HRF*.
- Hannant, D. (1978). *Fibre cements and fibre contents*, Ed John Willey Y Sons Ltd, Chichester.
- Kaklauskas, G., y Ghaboussi, J. (2001). *Stress-Strain Relations for Cracked Tensile Concrete from RC Beam Tests*. Journal of Structural Engineering, 127(1), 64–73. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2001\)127:1\(64\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:1(64))
- Kooiman, A. (2000). *Modellin Steel Fibre Reinforced Concrete for Structural Design*. Tesis Doctoral: Delft University of Technology.
- Laranjeira, F. (2010). *Design-oriented constitutive model for steel fiber reinforced concrete*.
- Löfgren, I., Stang, H., y Olesen, J. (2005). *Fracture Properties of FRC Determined through Inverse Analysis of Wedge Splitting and Three-Point Bending Tests*. Journal of Advanced Concrete Technology, 423-434.
- López, R.-D. (2013). *Determinación de cuantía y orientación de fibras en HRFA por inducción magnética: mejora de un método existente e implantación para probetas cilíndricas*. Tesis de Master, Universidad Politécnica de Cataluña.
- Mármol, P. C. (2010). *Hormigones con Fibras de Acero Características Mecánicas Hormigones con Fibras de Acero Características Mecánicas*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Martinie, L., y Roussel, N. (2011). *Simple tools for fiber orientation prediction in industrial practice*. Cement and Concrete Research, 41, 993-1000.

Massicotte, B. (2004). *Implementing SFRC design into North American codes: application to a building floor*. Invited paper to the International workshop on the advanced in fibre reinforced concrete, Italia, 73-80.

Model Code, fib. (2010). *Model Code 2010 Volume 1*.

Molins, C., Aguado, A., y Saludes, S. (2009). *Double Punch Test to control the energy dissipation in tension of FRC (Barcelona test)*. Materials and Structures, 42(4), 415–425. <http://doi.org/10.1617/s11527-008-9391-9>

Naaman, A. (2000). *Fiber Reinforcement for Concrete: Looking Back, Looking Ahead*. In *Proceedings of Fifth RILEM Symposium on Fiber Reinforced Concretes (FRC)*. BEFIB, 65-86.

NBN B 15-238. (1992). *Test on fibre reinforced concrete – bending test on prismatic samples*. Norme Belge, Institut Belge de Normalisation, Brussels.

Parmentier, B., De Grove, E., Vandewalle, L., y Van Rickstal, F. (2008). *Dispersion of the mechanical properties of FRC investigated by different bending tests*. fib Symposium "Tailor Made Concrete Structures", 507-512.

Pujadas, P. (2013). *Caracterización y diseño del hormigón reforzado con fibras plásticas*. Tesis Doctoral, Universidad Politecnica de Cataluña.

RILEM TC 162-TDF. (2003). *Test and design methods for steel fibre reinforced concrete - stress-strain design method: Final recommendations*. Materials and Structures, 560-567.

RILEM TC162-TDF. (2003). RILEM TC162-TDF: *Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. Tensión-Deformation design method*. Final Recommendation. Materials and Structures, 36(October), 560–567.

Saludes, R. (2007). *Ensayo de doble punzonamiento aplicado al hormigón reforzado con fibras*. Tesina de especialidad, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.

Serna Ros, P., Bossio, M., Zerbino, R., y Martí Vargas, J. (2012). *Fluencia y propiedades residuales de hormigones autocompactantes con fibras expuestos en estado fisurado a diferentes condiciones ambientales*. 3º Congreso Iberoamericano sobre Hormigón Autocompactante.

Stroband, J. (1998). *Standardisation of test methods for Steel Fibre Reinforced Concrete*. Delft University of Technology, Laboratory report no. 25.5.98-14.

Strack, M. (2008). *Modelling of crack opening of SFRC under tension and bending*. In: 7th International Rilem symposium on FRC: design and application, 323-332.

Tschegg, E., y Linsbauer, H. (1986). *Testing procedure for determination of fracture mechanics parameters*. Patentschrift no. A-233/86, Österreichisches Patentamt.

Utkjaer, J., Krenk, S., y Brincker, R. (1995). *Analytical model for fictitious crack propagation in concrete beams*. ASCE Journal Engineering Mechanics.

UNE 12390-3. (2003). *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a la compresión de probetas*. Aenor.

UNE 83515. (2010). *UNE 83515 Método Barcelona*.

UNE-EN 14488-3. (2007). *UNE-EN 14488-3:2007. Ensayos de hormigón proyectado. Parte 3: Resistencias a flexión (primer pico, última y residual) de probetas prismáticas reforzadas con fibras*.

UNI 11104. (2004). *Classi di esposizione ambientale*.

Van Mier, J., y Van Vliet, M. (2002). *Uniaxial tension test for the determination of fracture parameters of concrete: state of the art*. Engineering Fracture Mechanics, 69, 235-247.

ANEJOS

En este apartado se agrupan datos de interés como hojas técnicas de los materiales empleados, esquemas, y resultados de ensayos.

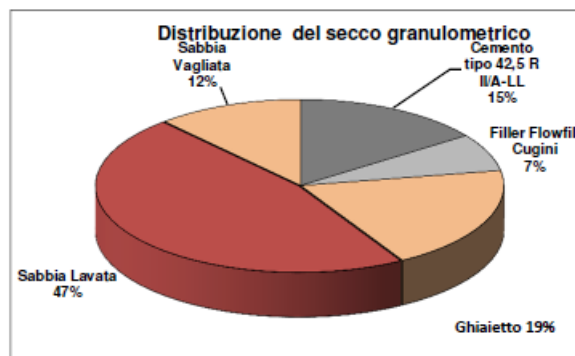
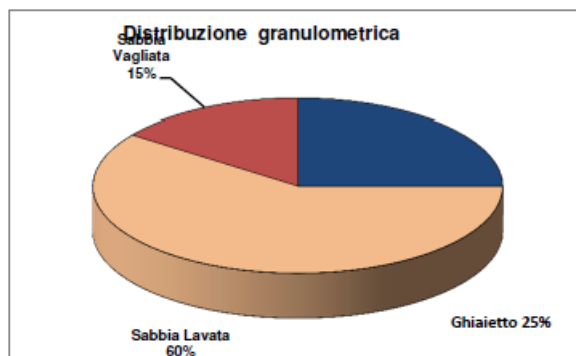
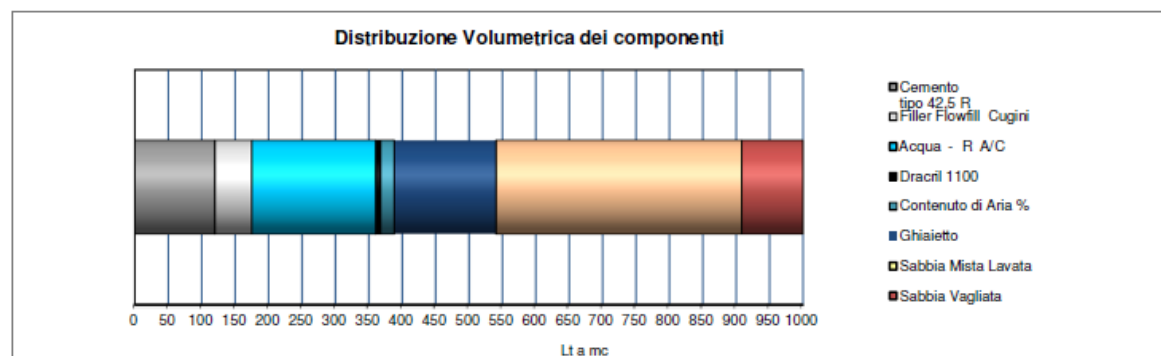
ANEJO A: FICHA TÉCNICA DE HORMIGÓN

Progetto volumetrico di calcestruzzo preconfezionato. U.P. Lecco / Galbiate Rck 35 XC3 S5 FIBRORINFORZATO

Dosaggio di cemento	370	Kg/m ³	Classe e tipo di cemento	CEM IV/A-LL 42,5 R Holcim
Classe di consistenza	S5	(≥ 220 mm)	Additivo Fluidificante	Dracril 1100 Draco Italiana
Diametro massimo	32 (22)	mm	Aggregati	Ghiaietto Holcim Gorla Minore Sabbia Lavata Benedetti Giovanni Sabbia Vagliata Holcim Gorla Minore
Classe di esposizione	XC3			
Contenuto di aria %	2		Filler	Flowfill Cugini

Mix Design				Calcolo delle percentuali in massa secca		
	Componenti Kg	Dati di progetto		Componenti %		
Cemento tipo 42,5 R II/A-LL	370	370	Kg/m ³	Cemento tipo 42,5 R II/A-LL	15	%
Filler Flowfill Cugini	150	150	Kg/m ³	Filler Flowfill Cugini	7	%
Acqua	185	0,50	R A/C	Ghiaietto	19	%
Dracril 1100	7,8	1,5%	%(s.p.c.)	Sabbia Lavata	47	%
Contenuto di Aria %	0	2,0	%	Sabbia Vagliata	12	%
Ghiaietto	409	25	%	Volume dei fini	201	
Sabbia Lavata	993	60	%	Volume della pasta	393	
Sabbia Vagliata	244	15	%			

Massa volumica	2358	Kg/m ³
----------------	------	-------------------



ANEJO B: FICHA TÉCNICA DE FIBRAS DE ACERO

F-DUE 60/60 (HT-CE 01372-CPR-0720 – EN 14889-1)

DESCRIZIONE

Fibra metallica fabbricata da nastro di acciaio a basso tenore di carbonio, per rinforzo strutturale del calcestruzzo e altri conglomerati cementizi.

DIMENSIONI NOMINALI

[UNI EN 14889—1:2006]

Lunghezza (L)	60 mm
Diametro	1.00 mm
Rapporto	60
Forma	Rettilenea (2 tacche)

RIVESTIMENTO [UNI EN 14889—1:2006]

Nessuno

CARATTERISTICHE MECCANICHE DEL NASTRO [UNI EN 14889—1:2006]

Resistenza a trazione (R_m)	> 1200 MPa
Carico di snervamento (R_e)	> 1120 MPa
A%	> 4
Modulo di elasticità (E)	210000 MPa

COMPOSIZIONE CHIMICA DELL'ACCIAIO

C max.	0,120 %
P max.	0,045 %
S max.	0,045 %
Mn max.	2,000 %

PESO E NUMERO DI FIBRE PER KG

Peso fibre (kg/CAD)	3.84×10^{-4}
N° di fibre per kg	2602

RESISTENZE CARATTERISTICHE RESIDUE A FLESSIONE [UNI EN 14651:2007]

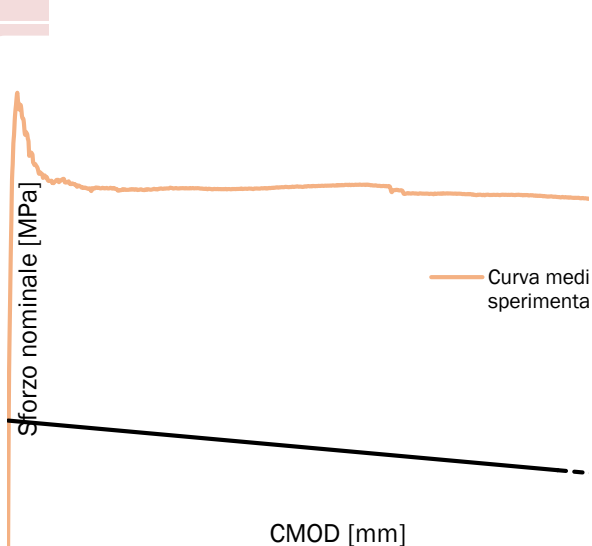
Le caratteristiche prestazionali del materiale composito sono state ottenute a partire dall'esecuzione di un programma sperimentale, ove si hanno provato sei (06) travetti standardizzati, d'accordo alla UNI EN 14651, al fine di classificare il materiale a seconda della fib Model Code 2010.

Classe Calcestruzzo	C 30/35	Classificazione
Consistenza	S4	fib Model Code 2010
Dosaggio fibre	30 kg/m ³	3.0c

Caratteristiche del getto e classificazione

Valori caratteristici del limite di proporzionalità e delle resistenze residue a flessione

La figura mostra la curva media sperimentale Sforzo nominale – CMOD e il modello lineare



costitutivo allo stato limite ultimo (SLU) proposto da fib Model Code 2010.

ISTRUZIONI DI MISCELAZIONE

- Utilizzare aggregato con una granulometria continua e con dimensione massima non superiore a 1/2 della lunghezza delle fibre.
- La quantità minima di fibre non deve essere inferiore a 25 kg/m³ per garantire una continuità del rinforzo.
- Le fibre di acciaio possono essere aggiunte al mix di transito negli autocarri, dopo che tutti gli altri ingredienti sono stati aggiunti e mescolati.
- Mentre le fibre vengono aggiunte, il miscelatore deve essere fatto funzionare a normale velocità di ricarica in modo che le fibre cadono direttamente sulla miscela di calcestruzzo essendo mescolate nel cemento, non appena entrano nel mixer, evitando le sue aggregazioni. Dopo che le fibre sono aggiunte, il miscelatore deve essere rallentato alla velocità nominale di miscelazione pari a 30/40 giri.

EFFETTO SULLA CONSISTENZA DEL CALCESTRUZZO [UNI EN 14845-2:2007]

Consistenza con 25 kg/m³ di fibre: tempo Vebè 25 s.

EFFETTO SULLA RESISTENZA DEL CALCESTRUZZO [UNI EN 14845-2:2007]

25 kg/m³ di fibre: per ottenere 1.5 N/mm² a CMOD = 0.5 mm e 1.0 N/mm² a CMOD = 3.5 mm.

APPLICAZIONI

- Pavimentazioni industriali
- Calcestruzzi prefabbricati

Limite di proporzionalità e resistenze residue (valori caratteristici, MPa)					Resistenze residue allo SLS e SLU	
$f_{ct,L}^f$	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$	$f_{Fts,k}$	$f_{Ftu,k}$
5.42	3.59	3.53	3.44	2.85	1.61	1.00

NORMATIVA DI RIFERIMENTO

- EN 14889-1—Fibres for concrete—Part 1: Steel fibres—Definition, specifications and conformity.
- UNI EN 14651—Metodo di prova per calcestruzzo con fibre metalliche. Misurazione della resistenza a trazione per flessione [limite di proporzionalità (LOP), resistenza residua].
- UNI EN 14845-2—Metodi di prova delle fibre per calcestruzzo. Parte 2: Effetto sul calcestruzzo.
- CNR-DT 204/2006—Istruzioni per la progettazione l'esecuzione ed il controllo di strutture di calcestruzzo fibrorinforzato.
- fib Model Code 2010

IMBALLAGGIO

Il materiale viene confezionato in scatole di cartone di 20 kg, su pallet 1200 x 800 x 1330 h [mm], contenenti ciascuno 48 scatole per un peso lordo complessivo di circa 960 kg.

STOCCAGGIO

Conservare i pallets al riparo dagli agenti atmosferici.

I pallets non sono sovrapponibili tra loro.

SIMBOLI E ABBREVIAZIONI

CMOD	Apertura di fessura alla bocca dell'intaglio
$f_{ct,L}^f$	Limite di proporzionalità
$f_{R,j}$	Resistenza a trazione per flessione residua per CMOD _j (j= 1, 2, 3, 4 per CMOD _j = 0.5, 1.5, 2.5 e 3.5 mm rispettivamente)
$f_{Fts,k}$	Resistenza residua di servizio caratteristica

BENEFICI

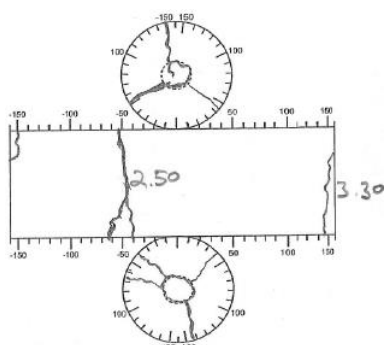
Miglioramento delle prestazioni del calcestruzzo nella fase post-fessurativa, tramite un aumento della tenacità e duttilità del composito fibrorinforzato.

 $f_{Ftu,k}$

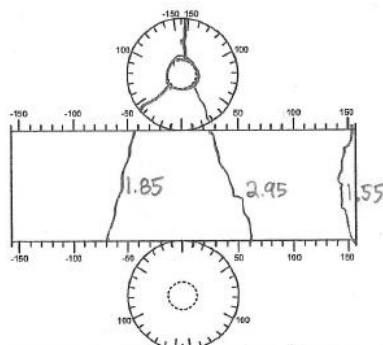
Resistenza residua ultima caratteristica

ANEJO C: MAPA DE FISURAS EN TESTIGOS

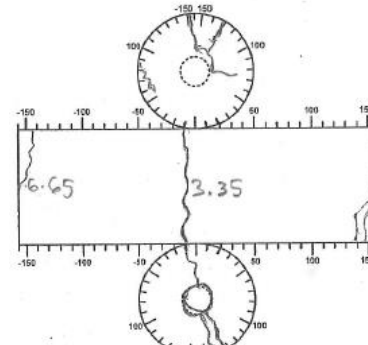
A10-1



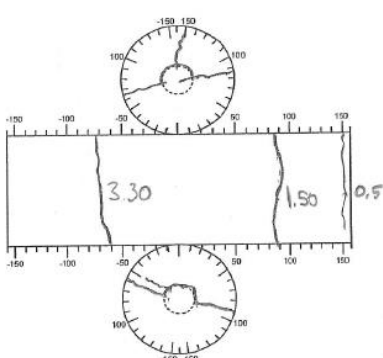
A10-2



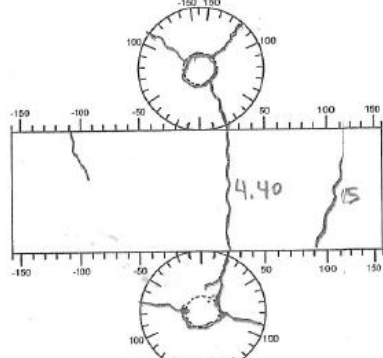
A10-3



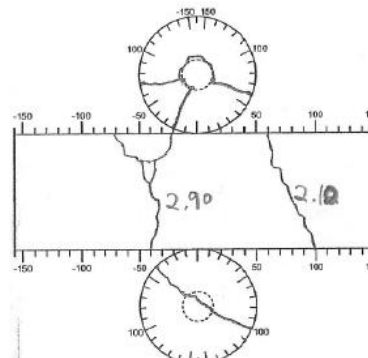
A1-1



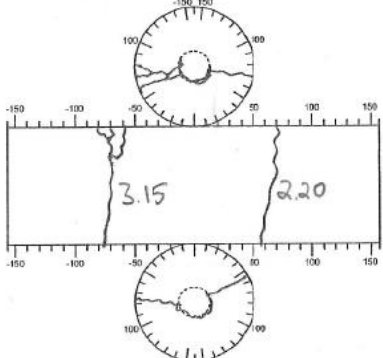
A1-2



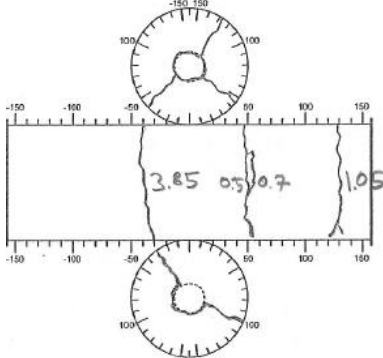
A1-3



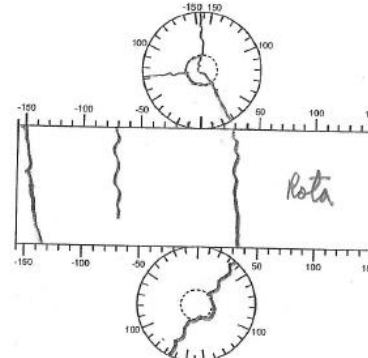
A4-1



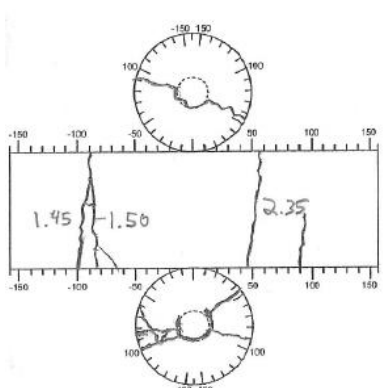
A4-2



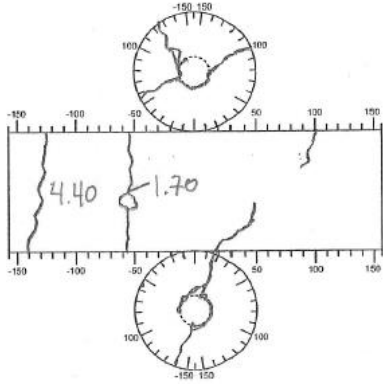
A4-3



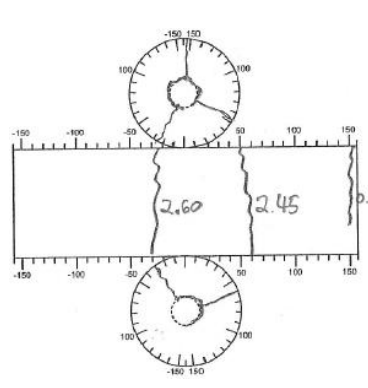
A7-1

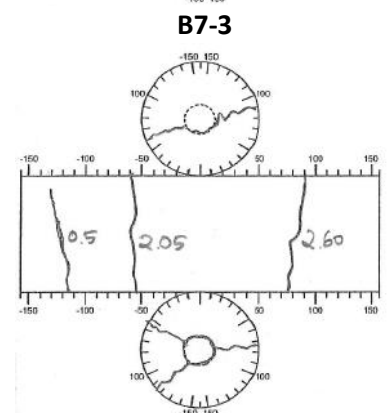
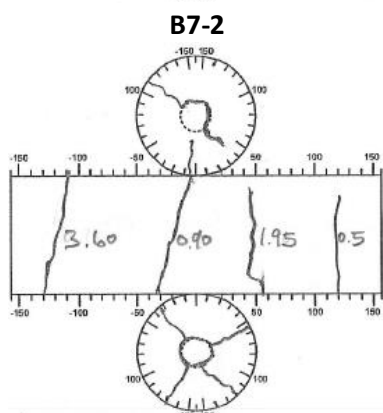
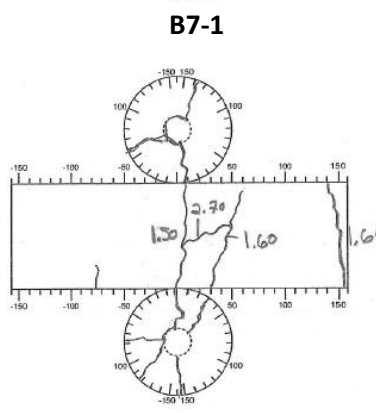
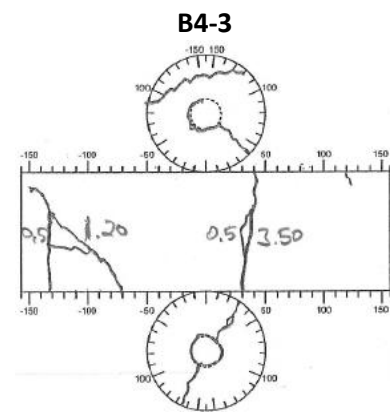
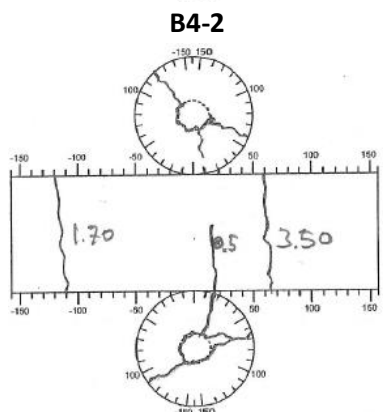
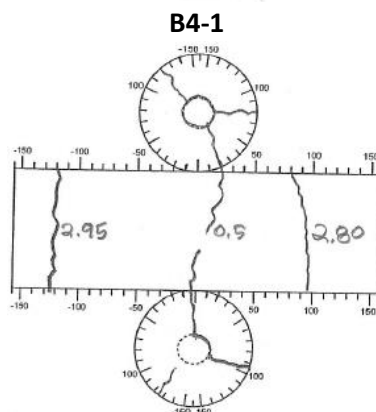
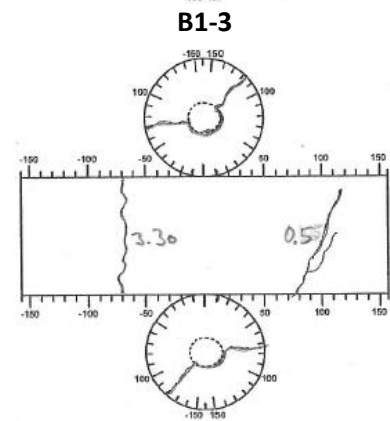
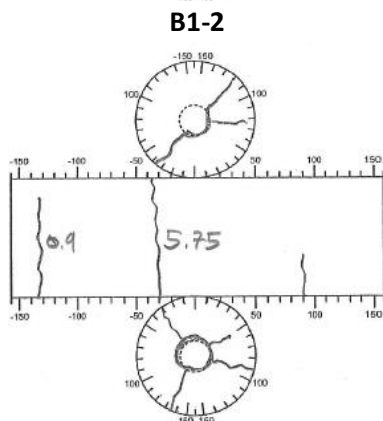
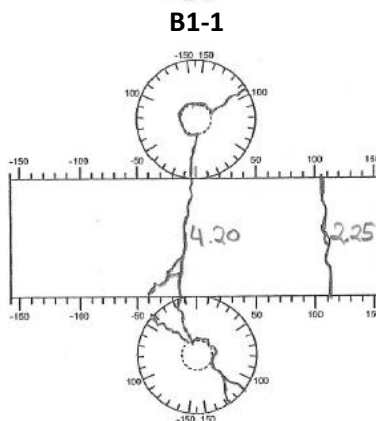
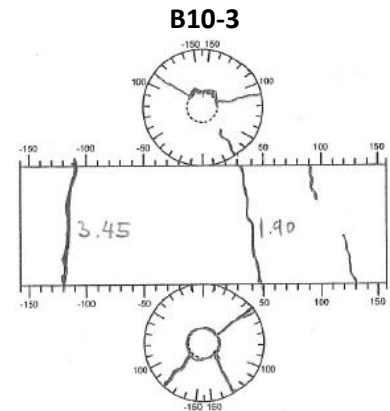
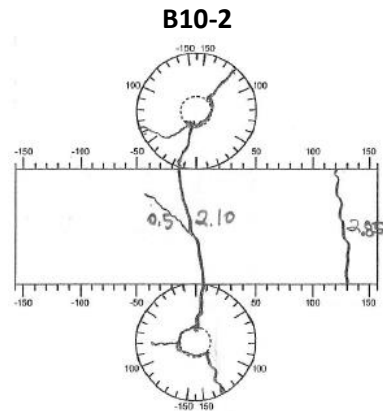
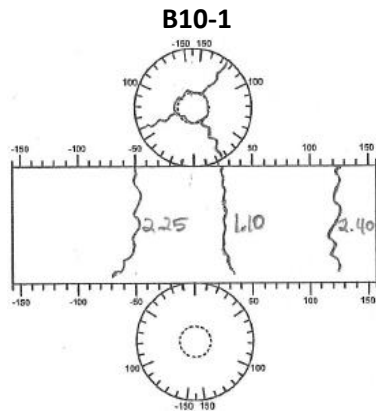


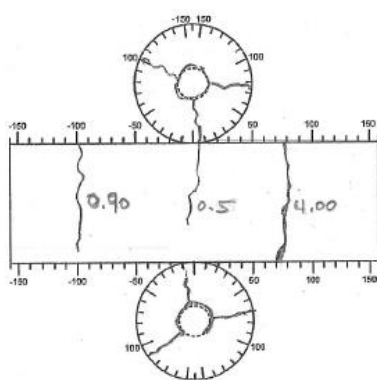
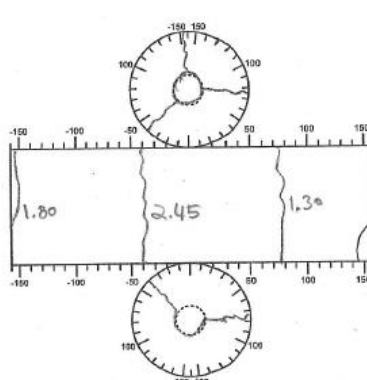
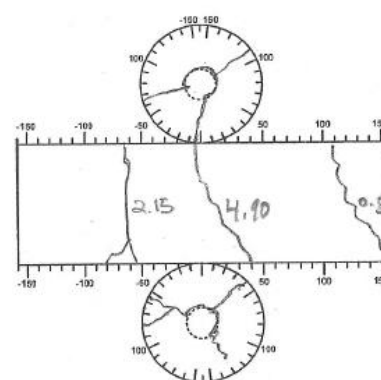
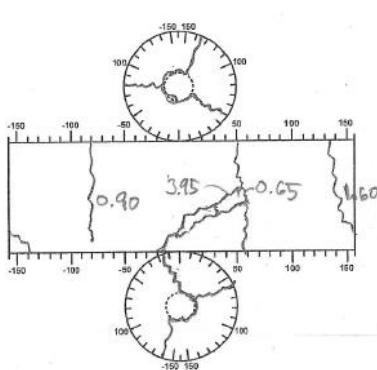
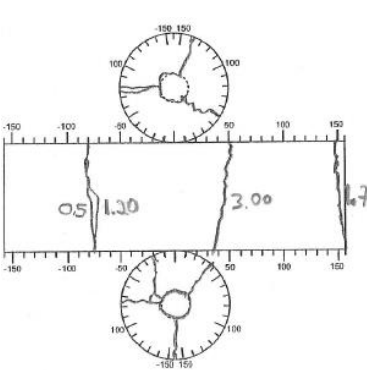
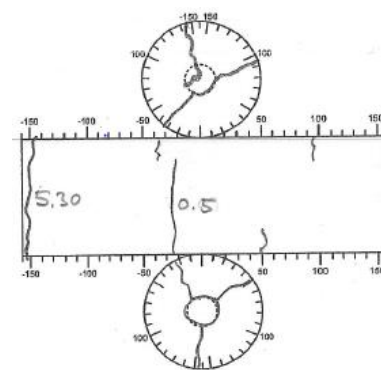
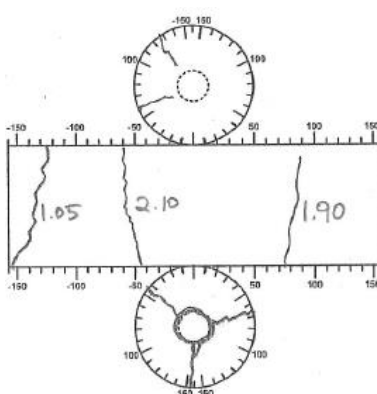
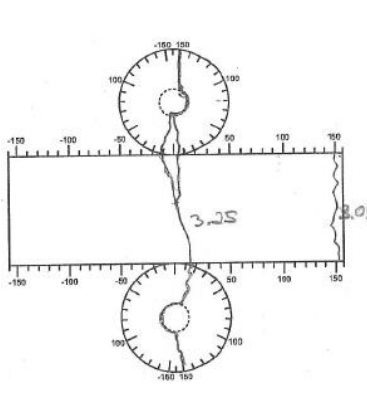
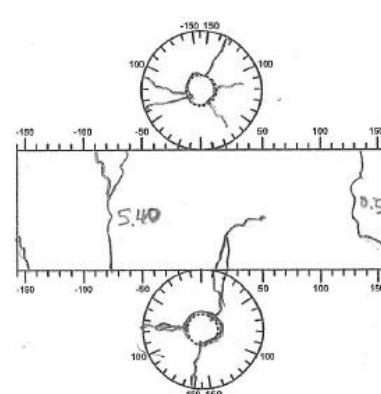
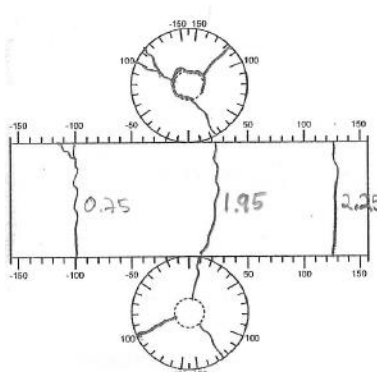
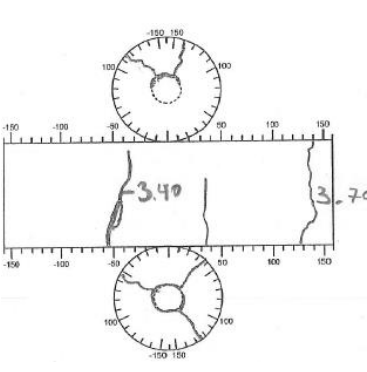
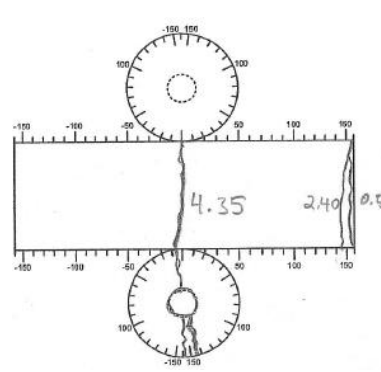
A7-2

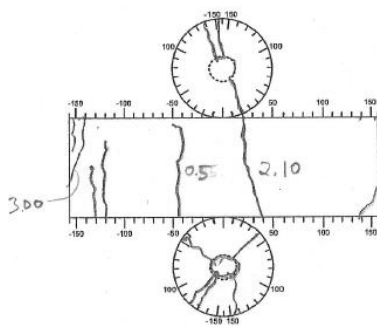
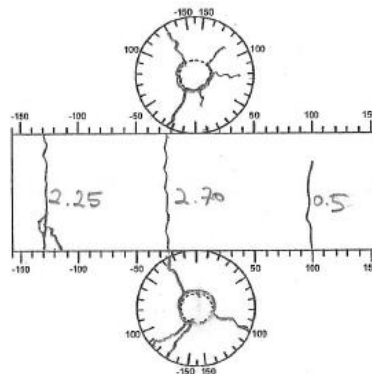
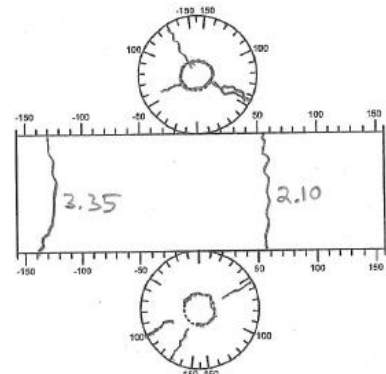
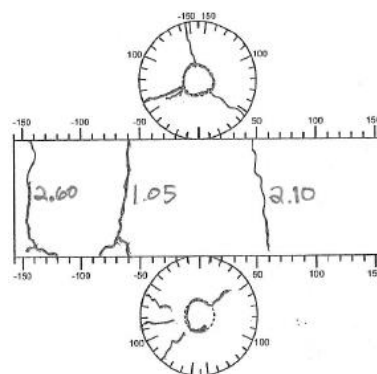
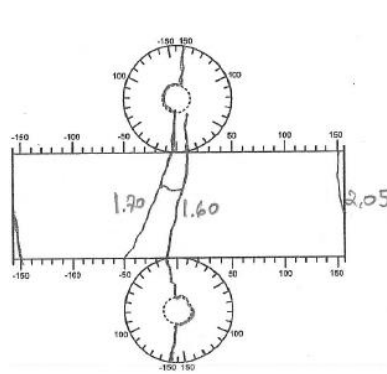
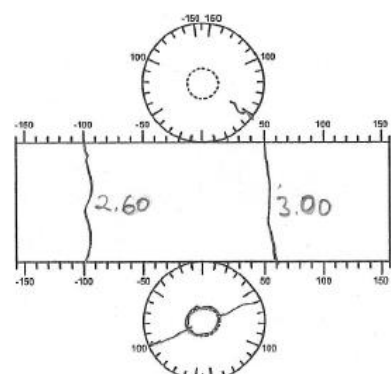
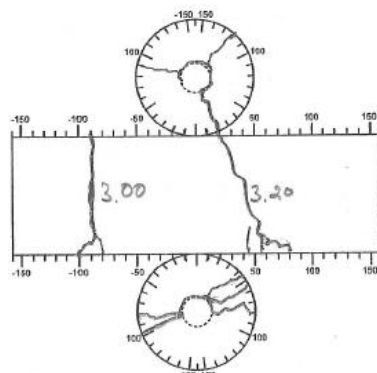
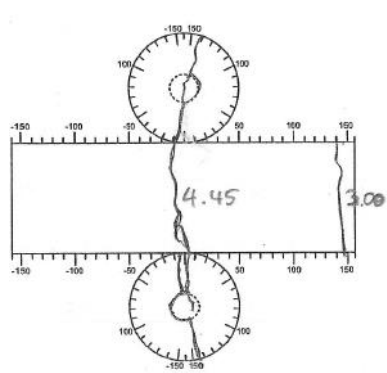
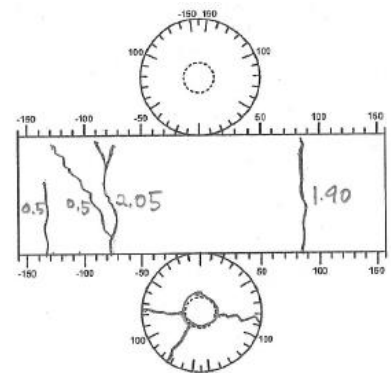
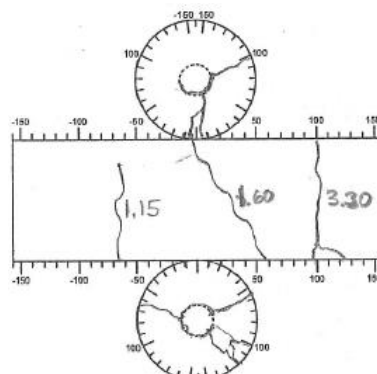
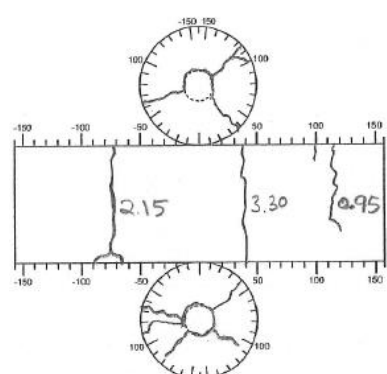
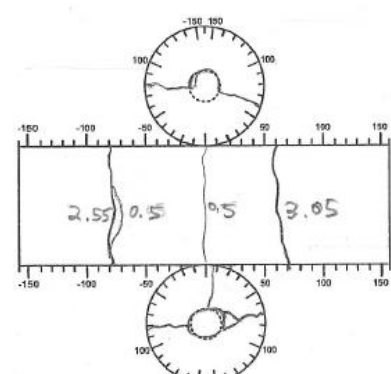


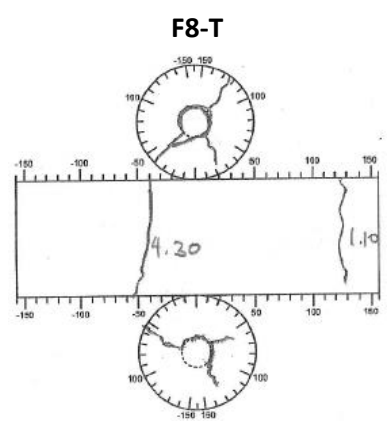
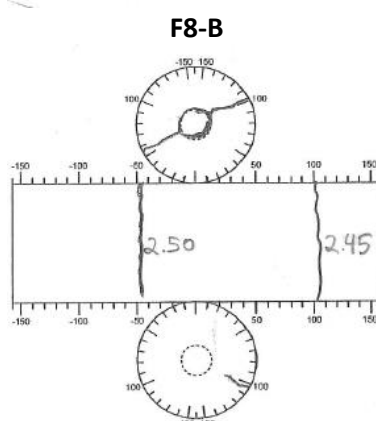
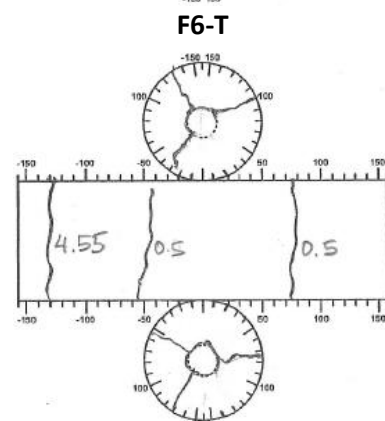
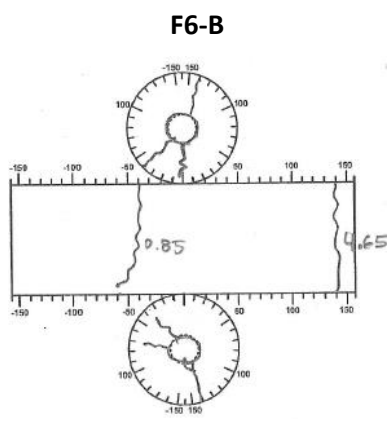
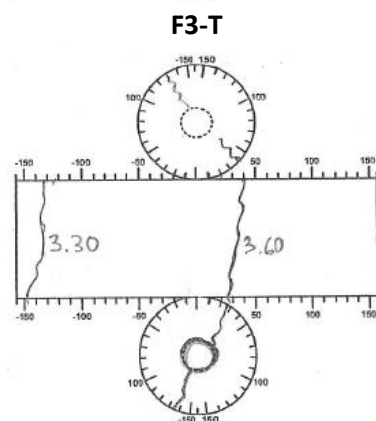
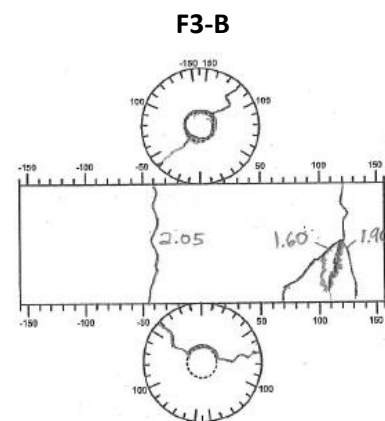
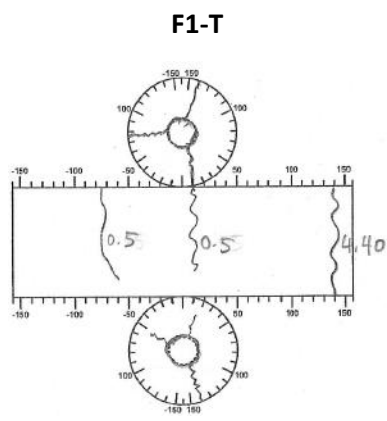
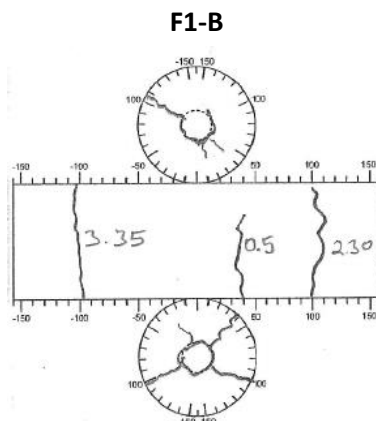
A7-3





E10-B**E10-T****E12-B****E12-T****E13-B****E13-T****E15-B****E15-T****E1-B****E1-T****E3-B****E3-T**

E6-B**E6-T****E8-B****E8-T****F10-B****F10-T****F12-B****F12-T****F13-B****F13-T****F15-B****F15-T**



ANEJO D: MAPAS RADIALES DE INDUCTANCIA POR NÚCLEO

